Цена 32 коп.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «СВЯЗЬ»

А. Б. ЦАЛИОВИЧ

*

МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ СВЯЗИ

*

Анатолий Борисович Цалиович

МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ
КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ СВЯЗИ

Редактор *Н. А. Сецко*

Техн. редактор *Г. И. Шефер* Корректор *М. Х. Механик*

Сдано в набор 19/IV 1972 г. Подписано в печ. 3/V 1973 г.
Форм. бум. 84×108/32 3,0 печ. л. 5,04 усл.-п. л. 6,43 уч.-изд. л.
Т-08117 Тираж 6000 экз. Бумага типогр. № 2 Зак. изд. 15468 Цена 32 коп.
Издательство «Связь», Москва-центр, Чистопрудный бульвар, 2

Типография издательства «Связь» Государственного комитета Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. Москва-центр, ул. Кирова, 40. Зак. тип. 194

А. Б. ЦАЛИОВИЧ

МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ СВЯЗИ

Под редакцией Н. А. Сецко

ATC.1

ИЗДАТЕЛЬСТВО «СВЯЗЬ»
МОСКВА 1973

6Ф.1
Ц 12
УДК 621.395.51

А. Б. Цалиович

Ц 12 Методы оптимизации параметров кабельных линий связи.

96 с. с илл.

Обосновываются методы оптимизации параметров магистралей и конструкций кабелей связи. Получена в аналитическом виде зависимость между электрическими, конструктивными и стоимостными характеристиками отдельных элементов, в частности, кабелей, оконечной и промежуточной аппаратуры усиления и уплотнения. На основе расчетов показаны возможности предлагаемых методов.

Книга рассчитана на широкий круг специалистов проектных и строительных организаций, научно-исследовательских и учебных институтов, предприятий, занимающихся проектированием и эксплуатацией кабелей связи.

Ц $\frac{0362—52}{045(01)—73}$ 59—72 6Ф1

© Издательство «Связь», 1973 г.

17. Аппаратура систем передачи по линиям связи. Справочник. М., «Связь», 1970.
18. Окунев Ю. Б. Опыт оптимального проектирования систем связи. Ленинградский дом научно-технической пропаганды. Л., 1972.
19. Цыкин Г. С. Усилительные устройства. М., «Связь», 1971.
20. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров. М., «Наука», 1964.
21. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М., «Наука», 1971.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кокшарский Н. С. Технико-экономические обоснования при проектировании средств и сооружений проводной связи. М., «Связь», 1965.
2. Экономическая эффективность и стимулирование создания и внедрения новой техники связи. М., «Связь», 1969.
3. Greißler Helmut. Beitrag zur Klärung der Entwicklungstendenzen von Tragerfrequenz—Kabelsystemen. — «Nachrichtentechnische Zeitsrift», Heft 9, 1965.
4. Типовая методика определения экономической эффективности капитальных вложений. М., «Экономика», 1969.
5. Local Telephone Networks. C.C.I.T.T. Published by the International Telecommunication Union, 1968.
6. Гуд Г. Х., Макол Р. Э. Системотехника. Введение в проектирование больших систем. М., «Советское радио», 1962.
7. Акоф Р., Сасиени М. Основы исследования операций. М., «Мир», 1971.
8. Ланге О. Оптимальные решения. Основы программирования. М., «Прогресс», 1967.
9. Корн Г. и Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М., «Наука», 1968.
10. Гроднев И. И., Курбатов Н. Д. Линейные сооружения связи. М., «Связь», 1968.
11. Инженерно-технический справочник по электросвязи. Кабельные и воздушные линии связи. М., «Связь», 1966.
12. Шарле Д. Л. О приближенных формулах расчета вторичных параметров передачи кабелей связи. «Труды НИИКП», вып. I, 1956.
13. Гроднев И. И., Сергейчук К. Я. Экранирование аппаратуры и кабелей связи. М., Связьиздат, 1960.
14. Гличев А. В. Экономическая эффективность технических систем. М., «Экономика», 1971.
15. Гуткин Л. С. Проблемы оптимизации радиосистем. «Радиотехника», 1971, № 5.
16. Каден Г. Электромагнитные экраны в высокочастотной технике электросвязи. М., Госэнергоиздат, 1957.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Предисловие 4

1. Основные принципы оптимизации кабельных линий связи . . . 7

1.1. Основные определения 7
1.2. Принципы исследования эффективности сооружений связи 10
1.3. Методика определения оптимальных характеристик магистралей и кабелей связи 16

2. Функциональные зависимости между основными характеристиками сооружений связи 20

2.1. Принципы укрупненного расчета стоимости оборудования связи 20
2.2. Зависимость стоимости кабелей связи от конструктивных характеристик 23
2.3. Определение зависимости между стоимостными, конструктивными и электрическими характеристиками кабелей связи 28
2.4. Определение зависимости между стоимостными и эксплуатационно-техническими характеристиками аппаратуры уплотнения и усиления для кабельных линий связи . . . 39
2.5. Зависимость количества промежуточных усилительных пунктов на магистрали от характеристик кабелей и аппаратуры уплотнения 48

3. Выбор оптимальных характеристик магистралей и кабелей связи 52

3.1. Общие положения 52
3.2. Выбор параметров цепей низкочастотных кабелей для городских телефонных сетей 55
3.3. Выбор параметров цепей симметричных высокочастотных кабелей связи при заданном типе аппаратуры уплотнения 61
3.4. Особенности выбора параметров цепей коаксиальных кабелей связи 75
3.5. Выбор основных характеристик аппаратуры уплотнения при заданной конструкции кабеля связи 79
3.6. Выбор основных характеристик линейного тракта системы связи 84
3.7. Определение оптимальной номенклатуры кабелей для абонентских линий ГТС 87

4. Некоторые особенности проведения расчетов при оптимизации параметров кабельных линий связи 90

Литература 94

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА

Расширение сети связи страны является неотъемлемым элементом научно-технического прогресса нашего общества, важным фактором повышения культурного уровня жизни народа. По девятому пятилетнему плану развития народного хозяйства СССР на 1971—1975 гг. намечается почти вдвое увеличить протяженность междугородных телефонных каналов, расширить сеть каналов междугородного телевизионного вещания, существенно расширить и усовершенствовать сеть местной телефонной связи в городах, совхозах и колхозах.

Осуществление широкой программы развития средств связи сопровождается огромным размахом строительства сооружений связи, непрерывным совершенствованием оборудования и внедрением новой техники. При этом, учитывая, что строительство сети проводной связи сопряжено с большими долгосрочными капиталовложениями, особое значение приобретают задачи технико-экономического обоснования применяемых конструкций и проектных решений.

В настоящее время как при проектировании линий и сетей связи, так и при разработке новых типов кабелей и аппаратуры уплотнения методика технико-экономического обоснования и поиск оптимальных решений осуществляются путем расчета и сравнения системы технико-экономических показателей для нескольких возможных вариантов. Например, в работах [1—3] рассмотрены технико-экономические решения при проектировании кабельных магистралей дальней связи, линий городских и сельских телефонных сетей как определение наиболее целесообразного варианта из сравнения нескольких возможных вариантов на базе имеющихся конструкций кабелей, типовых систем уплотнения и станционных сооружений городских телефонных сетей (ГТС). При таком подходе технико-экономическая оптимальность выбранного решения в значительной мере зависит от опыта и интуиции разработчика, так как выбор делается из нескольких предварительно намеченных вариантов, и нет уверенности, что хотя бы в один из них заложены наилучшие (оптимальные) параметры. Методы технико-экономического обоснования и поиск оптимальных решений путем перебора вариантов оказываются недостаточно эффективными при анализе систем связи с учетом большого числа факторов, при разработке нового оборудования, в частности кабелей связи, когда для поиска оптимальных конструкций необходимо исследовать технико-экономические показатели в ходе непрерывного изменения нескольких основных конструктивных параметров.

В настоящее время благодаря прогрессу в области электронной техники, широкому внедрению пластмасс и прогрессивной технологии

оболочки и т. д.) не приводят к сколько-нибудь заметным изменениям величины оптимального соотношения $(d_1/d_0)_{опт}$. Другим примером является исследование низкочастотного кабеля ГТС (см. рис. 3.2 и 3.3), когда наличие канализации, стоимость которой можно отнести к стоимости оболочки, также не приводит к заметным изменениям величины $(d_1/d_0)_{опт}$.

Однако еще важнее то обстоятельство, что даже при значительных изменениях различных факторов и, в частности, при весьма больших отклонениях от оптимальных условий сравнительные стоимостные характеристики оборудования связи, в том числе, представляющий наибольший интерес в качестве критерия оптимальности, сравнительный показатель приведенных затрат на систему связи, изменяются несущественно. В этом легко убедиться, проанализировав графики, приведенные в гл. 3, из которых видно, что все кривые имеют пологие минимумы. Таким образом, в «почти стационарной» области величину приведенных затрат можно принять постоянной при изменении независимых переменных в широких пределах. Например, как следует из рис. 3.13, описывающего зависимость величины приведенных затрат $Q_г^{(1)}$ на магистраль СТС с одночетверочным кабелем, уплотненным аппаратурой КНК-6, в пределах изменения коэффициента затухания от 0,35 до 0,65 *неп/км* (почти на 85%) величина $Q_г^{(1)}$ изменяется лишь от 58 до 62 *руб/км* (менее чем на 8%). Следовательно, в области оптимума величина функции $Q_г^{(1)}$ изменяется в 10 раз медленней независимой переменной α. Даже применение таких различных по техническим принципам и частотному диапазону уплотнения систем, как КНК-6 и ИКМ-12 (рис. 3.13 и 3.14), приводит к практически одинаковой величине $\theta_{опт}$.

Аналогичным образом действуют изменения цен на исходные материалы. Например, если для рассмотренного низкочастотного кабеля типа ТП при изменении (в сторону уменьшения или увеличения) цены на медь в два раза оставить прежнюю величину $(d_1/d_0)_{опт}$, то стоимость кабеля возрастет (по сравнению с новым оптимальным соотношением d_1/d_0) всего на 2%.

Естественно, в этих условиях даже значительные колебания различных факторов не приводят к существенным изменениям величины приведенных затрат.

Отсюда следует очень важный вывод: при выборе параметров оборудования связи совсем не обязательно стремиться к точке минимума — достаточно войти в «почти стационарную» область допустимых значений выбираемых характеристик. Такой подход предоставляет определенную свободу выбора характеристик линий и оборудования связи. Кроме того, в этом случае появляется возможность варьирования в весьма широких пределах выбираемыми параметрами кабеля и аппаратуры уплотнения без заметного снижения технико-экономической оптимальности магистрали в целом.

◆

По сравнению с истинным минимумом, получаемым из приведенного на рис. 3.6, 3.13 и 3.14 полного графического построения и анализа функции Q, погрешность в случае применения метода Зейделя—Гаусса окажется весьма небольшой. Величина этой погрешности будет тем меньше, чем меньше оптимальная величина $(d_1/d_0)_{опт}$ зависит от θ и чем ближе первоначально зафиксированное значение θ к величине $\theta_{опт}$.

Если между независимыми переменными имеется некоторая корреляция, то можно рекомендовать уточнение результатов, получаемых по методу Зейделя—Гаусса, заключающееся в том, что после нахождения $\theta_{опт}$ и $(d_1/d_0)_{опт}$ в результате первой серии расчета производится вторая серия, но уже первоначально фиксируется найденная в первой серии величина $\theta_{опт}$.

Если количество переменных и корреляция между ними велики, при численном определении экстремумов становится целесообразным применение различного рода «шаговых» процедур, например метода крутого восхождения (наискорейшего спуска) и др. В зависимости от условий конкретных задач могут применяться различные методы математического программирования: линейного, нелинейного, выпуклого, целочисленного, дискретного, динамического.

При правильной постановке задачи и соответствующем выборе независимых переменных физическая интерпретация результатов оптимизационных расчетов не представляет затруднений. При рассмотрении примеров решения задач такая интерпретация проводилась во всех случаях.

Весьма важным представляется вопрос оценки погрешности получаемых результатов и стабильности их при изменении различных факторов.

Действительно, с одной стороны, как исходные формулы, так и методы получения численных результатов (даже теоретические, поскольку при их выводе сделан ряд допущений) обладают некоторыми погрешностями. Величина этой погрешности оценивалась во всех случаях при изложении соответствующих вопросов путем сопоставления с параметрами существующих конструкций. С другой стороны, наблюдаются непрерывные колебания цен на исходные материалы и полуфабрикаты и соотношений различных видов затрат и расходов, а также изменения качественных характеристик оборудования.

Практический интерес представляют не сами по себе величины погрешностей и изменений различных факторов (поскольку оптимизационные расчеты носят сравнительный характер), а влияние их на величины оптимальных соотношений параметров.

Пользуясь приведенными формулами и графиками, можно показать, что при имеющих место погрешностях и колебаниях различных факторов изменения оптимальных соотношений являются весьма малыми. Это объясняется тем, что указанные погрешности и колебания в равной степени влияют на все сравниваемые варианты (условие сопоставимости), вызывая почти одинаковые изменения их характеристик. Но при одинаковых изменениях характеристик оборудования их оптимальные соотношения почти не изменяются.

В качестве примера можно привести кривые рис. 3.8, где весьма значительные изменения стоимости оболочки (которые принципиально можно отнести за счет изменения конструкции, колебаний стоимости материалов, даже за счет погрешностей при расчете толщины

гии достигнуты существенные успехи в создании экономичных систем уплотнения кабельных цепей и в совершенствовании конструкций кабелей связи. Тенденции технического совершенствования и удешевления средств проводной связи сохранятся и в будущем. В этих условиях возрастает потребность в разработке эффективных методов технико-экономического расчета оптимальных конструкций оборудования связи.

В работе А. Б. Цалиовича сделана попытка исследования вопросов оптимизации кабельных линий связи с единых теоретических позиций на базе общих принципов исследования технико-экономической эффективности капитальных вложений и новой техники в хозяйстве связи. При этом определение оптимальных проектных и конструктивных решений для кабельных магистралей и отдельных ее элементов: кабелей и аппаратуры уплотнения — производится по оценке технико-экономических показателей сети или магистрали в целом. Так, например, для магистрали дальней связи общего пользования оптимальной будет такая конструкция кабелей связи, которая позволит организовать требуемое количество каналов, удовлетворяющих техническим нормам, и обеспечит минимум приведенных затрат (учитывающих совместно капитальные вложения и эксплуатационные расходы) на линейные сооружения, аппаратуру уплотнения и пр.

Предлагаемая методика базируется на представлении конструктивных и других исследуемых параметров кабелей и аппаратуры связи в виде аналитических зависимостей от технико-экономических показателей кабельных магистралей. Определение оптимальных параметров в этом случае можно производить традиционными математическими методами, например методом частных производных. Причем в отдельных конкретных задачах оптимизации кабельных линий автору удается получить достаточно простые аналитические зависимости и соотношения для расчета оптимальных параметров и дать наглядные графические представления, позволяющие проследить условия формирования оптимальных соотношений и «глубину» оптимумов.

В работе кратко рассматриваются общие принципы исследования технико-экономической эффективности линий связи и их элементов: аппаратуры и кабелей — и приводятся соображения о построении математических моделей исследуемых объектов и выборе критериев оптимальности.

Учитывая высокую стоимость линейно-кабельных сооружений, в первую очередь определяются пути решения задачи выбора оптимальных конструкций кабелей связи, а также некоторых, наиболее важных с точки зрения системы связи в целом, параметров аппаратуры уплотнения и усиления. Для этого предварительно выводятся аналитические зависимости между стоимостью кабеля, аппаратуры уплотнения и усиления, их конструктивными и электрическими характеристиками. Приводятся примеры применения методики оптимизации к решению ряда конкретных задач для сетей дальней и местной связи. Эти примеры актуальны сами по себе и вместе с тем показывают рациональные пути упрощения общей задачи оптимизации в конкретных ситуациях. Представляют интерес в работе и некоторые результаты промежуточных исследований: зависимости геометрических размеров кабельных цепей от вторичных параметров, анализ составляющих затрат на кабельные магистрали различного назначения и некоторые др.

Вместе с тем предлагаемую методику оптимизации кабельных линий связи нельзя считать полной и завершенной. В последнее время появился ряд новых положений и инструктивных материалов, касающихся расчета и нормирования некоторых технических и экономических характеристик оборудования связи. Некоторые примеры иллюстративной части в определенной степени устарели. Так, приведенный анализ станционного оборудования и выведенные соотношения касаются в основном ламповой аппаратуры. Проектирование новой аппаратуры производится с использованием полупроводниковых и интегральных схем. Автор не показывает, в какой мере рекомендуемые им соотношения применимы для оптимизации принципиально новых систем связи. Развитие методики может происходить как в направлении совершенствования ее основных принципов, так и в сторону количественного и качественного расширения круга задач. Кроме того, возможна замена использованных зависимостей другими, более точными, а также применение новых, ранее неизвестных соотношений. Можно ожидать также совершенствования привлекаемого математического аппарата, в частности, за счет применения новых вычислительных методов.

В заключение следует отметить, что работа А. Б. Цалиовича характеризуется новым перспективным подходом к решению задачи оптимизации кабельных линий связи. Она будет полезна широкому кругу специалистов: инженерам и научным работникам электросвязи и кабельной промышленности, студентам старших курсов вузов и техникумов связи.

Отзывы о работе следует направлять в издательство «Связь» по адресу: Москва-центр, Чистопрудный бульвар, 2.

Н. Сецко

Метод частных производных оказывается особенно полезным для теоретического анализа, так как позволяет выявить в виде соответствующих формул основные зависимости между оптимальными величинами характеристик и констант. Этот метод эффективен в сочетании с графическим построением исследуемых функций. Несмотря на то, что графическое построение функций весьма трудоемко (и возможно только при количестве независимых переменных, не превышающем двух — при бо́льшем числе переменных возможно построение лишь частных зависимостей), оно позволяет анализировать исследуемые зависимости во всей области их определения. При этом особый интерес представляет «почти стационарная» область вблизи экстремумов.

Если отсутствует необходимость в проведении теоретического анализа, получение численных результатов может быть произведено сравнительно быстро различного рода приближенными экспрессными методами. Здесь возможны два пути проведения оптимизационных расчетов.

Первый путь заключается в приближенном решении системы уравнений, полученных приравниванием нулю соответствующих производных. Поскольку различные способы приближенного решения систем алгебраических уравнений хорошо известны и широко освещены в литературе [20], укажем лишь, что с их помощью решение уравнений оптимизации линий связи осуществляется весьма просто и быстро.

Гораздо бо́льший интерес представляет собой второй путь, при котором вообще не нужно брать частные производные, и определение экстремумов производится путем исследования исходной функции методами, получившими значительное развитие в последние годы в экономических исследованиях, в факторном анализе, в планировании эксперимента.

Поскольку описание соответствующих методов исследования функций не входит в задачу настоящей работы, ограничимся только несколькими замечаниями.

Если количество переменных невелико (2—3), а действие их на исходную функцию (например, величину приведенных затрат) независимо друг от друга, то минимум функции можно найти поочередным последовательным изменением одной из переменных в направлении соответствующего частного минимума функции при фиксированных значениях остальных параметров. Это — так называемый классический метод Зейделя—Гаусса.

Рассмотрим порядок применения метода Зейделя—Гаусса на примере. Пусть требуется определить оптимальным образом характеристики d_1/d_0 и $\alpha(\theta)$ одночетверочного кабеля для сельской связи при заданном типе аппаратуры уплотнения. Исходным выражением является первое слагаемое выражения (3.7) при указанных в § 3.3 ограничениях. Как видно из рис. 3.6, оптимальная величина d_1/d_0 почти не зависит от $\alpha(\theta)$, так что указанное условие применения метода Зейделя—Гаусса выполняется. Поэтому выбрав произвольно величину θ (желательно в области ожидаемых оптимальных значений ее, например, $1 \cdot 10^{-3}$ *неп·км*$^{-1}$·*гц*$^{-1/2}$), будем задаваться различными значениями d_1/d_0, пока функция $Q_{\text{г}}^{(1)}(d_1/d_0, \theta)$ не достигнет минимума. Затем, зафиксировав значение $(d_1/d_0)_{\text{опт}}$, изменяем аналогичным образом θ (или α), пока функция $Q_{\text{г}}^{(1)}$ опять не достигнет минимума, уже по этой переменной. Полученные величины $(d_1/d_0)_{\text{опт}}$ и $\theta_{\text{опт}}$ следует принять в качестве оптимальных.

4. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ РАСЧЕТОВ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ СВЯЗИ

Рассмотренные примеры подтверждают пригодность изложенной методики к решению ряда задач оптимизации параметров линий связи и позволяют выявить и некоторые общие черты и особенности методики оптимизации.

Уже на первом этапе проведения расчетов при постановке задачи и составлении уравнения или системы уравнений оптимизации возникает ряд вопросов, от правильности решения которых зависит как трудоемкость расчетов, так и ценность и даже справедливость получаемых результатов. К таким вопросам относятся, в первую очередь, полнота охвата параметров системы связи и влияющих факторов, выбор независимых переменных, характер учета физических и технических закономерностей, т. е. адекватность принимаемой математической модели объекту исследования. Основные пути разрешения этих вопросов освещены в предыдущих главах работы.

К сожалению, общее, вне конкретных задач, определение путей решения большинства вопросов, возникающих при постановке задачи и составлении системы уравнений оптимизации, едва ли возможно. Вследствие этого в данной работе пришлось ограничиться лишь некоторыми частными рекомендациями, а также несколько расширить ее иллюстративную часть, показав на отдельных примерах и частных случаях возможные альтернативы решения этих вопросов.

Следует подчеркнуть важность этапа проверки и уточнения модели и решения, необходимость в котором возникает вследствие погрешностей и допущений при построении модели и отыскании решения, а также некоторой специфики проведения численных расчетов. С целью такой проверки используемая математическая модель первоначально применяется к известному оборудованию и по результатам сравнения расчетных данных с реальными характеристиками вносятся коррективы в модель. Такой подход дает возможность получить удовлетворительный результат даже в случае весьма неточных исходных данных и соотношений.

Следующим этапом оптимизации параметров является математическая обработка моделей и получение численных решений, осуществляемых методами оптимального математического программирования.

Исследование относительно несложных моделей производится методом частных производных. Хотя в некоторых случаях анализ и решение полученных в результате дифференцирования уравнений представляет определенные вычислительные трудности, однако они не являются принципиальными, так как ввиду сравнительно небольшого количества переменных указанные операции практически всегда выполнимы простыми вычислительными средствами, аналитическими и графическими.

1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ОПТИМИЗАЦИИ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ СВЯЗИ

1.1. Основные определения

Понятию оптимальности оборудования связи часто придается различный смысл. Оптимальными считают конструкции симметричных цепей кабелей связи, обладающих наименьшей величиной сопротивления потерь, обусловленных эффектом близости, конструкции коаксиальных цепей, обладающих минимальным затуханием, промежуточные усилительные пункты минимальной стоимости и пр. Общим моментом во всех этих примерах является оптимальность конструкции лишь по какой-либо частной характеристике.

Хотя по отдельным характеристикам эти конструкции и являются предпочтительными, однако с точки зрения системы связи в целом их применение оправдывается не всегда. Например, увеличение коэффициента затухания высокочастотных кабелей в определенных пределах не отражается на работе линии и характеристиках каналов связи, так как оно может быть скомпенсировано более частым расположением промежуточных усилителей. Если окажется, что при использовании кабеля с бо́льшим коэффициентом затухания цепей все или большинство технических и экономических показателей магистрали не хуже, а некоторые даже лучше, тогда применение этой конструкции будет целесообразным. Очевидно, выбор параметров оборудования кабельных линий связи, рассматриваемых в качестве технических систем, должен производиться, исходя из анализа эффективности систем связи в целом с учетом всего многообразия существенных зависимостей между ее элементами, условий применения оборудования, существующего уровня и тенденций развития соответствующих направлений науки и техники. При этом эффективность системы связи должна оцениваться с точки зрения соответствия результатов и целей ее функционирования. Решение задачи оптимизации кабельных линий связи может быть получено на основе общих положений системного анализа методами системотехники [6] и исследования операций [7], формализующими анализ и сводящими проблему к задаче математического программирования [8].

В рассматриваемых задачах *объектами исследования* могут быть сеть, магистраль, линия связи либо их элементы: кабель, аппаратура уплотнения и усиления и пр. В качестве *критериев оптимальности* могут выступать как различные технические и экономические показатели системы связи и ее элементов, так и некоторые обобщенные параметры, определенным образом объединяющие все или часть этих показателей.

Для выявления наиболее общих свойств объектов исследования и критериев оптимальности целесообразно воспользоваться некоторыми представлениями и понятиями, заимствованными из кибернетики.

Если представить объект исследования в виде некоторой кибернетической системы — «ящика», то выходы этой системы, характеризующие цели исследования, будут представлять собой совокупность критериев оптимальности. Входы системы соответствуют ее *управляемым параметрам,* изменяя которые можно добиваться тех или иных значений на выходах. Суть технико-экономической оптимизации системы состоит в определении тех значений управляемых параметров, при которых значения частных критериев оптимальности будут наилучшими.

Математическая модель объекта исследования представляет собой систему уравнений (неравенств), связывающих критерии оптимальности и управляемые параметры, что соответствует связи выходов и входов кибернетической модели. Эти зависимости являются отражением объективно существующих в системе связи технических и экономических закономерностей, а также учитывают добавочные условия и ограничения конкретной задачи и математически могут быть заданы как в явном, так и в неявном виде.

Из общего назначения математических моделей логично следуют два основных требования к ним: простота и адекватность объекту исследования. Последнее определяет точность модели: полученные с ее помощью количественные оценки параметров не должны отличаться от фактических более, чем на допустимую величину.

Целесообразно ввести также понятия общности и сложности модели. Общность характеризуется количеством охваченных моделью во взаимной связи самостоятельных объектов исследования. Если, например, исследовать последовательно сеть связи в целом, отдельную магистраль или линию, кабель или аппаратуру уплотнения и т. д., то эти объекты можно рассматривать в качестве элементов некоторого иерархического ряда, из которого каждый предыдущий включает последующие. Очевидно, наиболее общим из перечисленных объектов будет сеть связи, а наименее общими — отдельные образцы оборудования или их элементы.

Сложность модели определяется количеством учитываемых параметров — управляемых (переменных) и заданных (постоянных), — учитываемых факторов, отражающих существо объекта исследования и способы математического представления зависимости между критериями оптимальности объекта и параметрами его элементов. Более общая модель необязательно должна быть и более сложной.

В зависимости от постановки задачи можно рассматривать разработку новых конструкций с весьма большим числом переменных (параметров), вплоть до электрических норм, либо определять оптимальным образом лишь некоторые, наиболее важные для рассматриваемой задачи, параметры. Можно также сузить задачу до выбора типа кабеля и аппаратуры из числа выпускаемых промышленностью. К параметрам кабельной магистрали, существенным образом влияющим на техническую и экономическую эффективность системы связи в целом, относятся: количество каналов, организуемых по одной цепи и по линии в целом, ширина и расположение линейного спектра частот (в случае высокочастотной связи), конструкция и размеры кабеля и цепей, параметры передачи цепей, параметры влияния и некоторые другие.

Однако с ростом числа учитываемых факторов и параметров, как правило, резко возрастает сложность математической модели и за-

Из системы (3.37), задавшись величиной l_{R_3}, находим оптимальные величины l_{R_1} и l_{R_2} и с учетом соотношения (3.34) — d_{01} и d_{02}, обеспечивающие минимальные затраты на медь (минимальный вес меди) для АЛ района.

Дальнейший расчет конструкции кабеля производится в соответствии с выводами § 3.2 из условия получения одинаковой дальности связи как по сопротивлению, так и по затуханию линий. Уравнения (3.37) легко решаются методом итерации.

В настоящее время максимальная длина АЛ на ГТС достигает в среднем 5 *км*. Задавшись $l_{R_3}=5$ *км*, из ур-ний (3.37) получаем следующую оптимальную номенклатуру диаметров жил: $d_{01}=0{,}39$ *мм*, $d_{02}=0{,}45$ *мм*, $d_{03}=0{,}5$ *мм*.

Таким образом, подтверждается, что наряду с диаметром жил 0,5 *мм* на ГТС необходимо применять жилы меньших диаметров. На отечественных сетях, в частности, уже применяются кабели с $d_0=0{,}4$ *мм*, разработаны и внедряются кабели с $d_0=0{,}32$ *мм*.

Так как в дальнейшем с увеличением телефонной плотности на ГТС намечается тенденция к сокращению длин АЛ, целесообразно также рассмотреть оптимальную номенклатуру кабелей и на ближайшую перспективу. Положив $l_{R_3}=2$ *км*, находим $d_{01}=0{,}25$ *мм*, $d_{02}=0{,}28$ *мм*, $d_{03}=0{,}31$ *мм*.

Как показывают результаты этих расчетов, тенденция к уменьшению диаметра жил абонентских кабелей должна сохраниться и в будущем. Однако это уменьшение связано также с проблемами технологического характера, монтажа, надежности линий и т. д.

Полученные выражения дают возможность не только определить оптимальную номенклатуру диаметров жил кабелей ГТС, но и найти необходимые пропорции выпуска каждой из них. Действительно, соотношение объемов потребляемых цепей с различными диаметрами жил должно быть равно соотношению суммарных длин АЛ с разными диаметрами жил, а именно:

$$V_3 : V_2 : V_1 = \left(l^3_{R_3} - l^3_{R_2} \right) : \left(l^3_{R_2} - l^3_{R_1} \right) : l^3_{R_1}. \qquad (3.38)$$

Из соотношения (3.38) получаем для $l_{R_3}=5$ *км*: $V_{0,5}:V_{0,45}:V_{0,39} \approx 42:33:25$; а для $l_{R_3}=2$ *км*: $V_{0,31}:V_{0,28}:V_{0,25} \approx 40:35:25$.

Если при максимальной длине АЛ 5 *км* кабели с диаметром жилы $d_0 \approx 0{,}4$ *мм* составляют всего лишь около 25% от общей протяженности АЛ, то при максимальной длине АЛ 2 *км* уже все АЛ могут быть организованы на жилах диаметром 0,32 мм.

Простейшие расчеты показывают, что использование этого кабеля может дать существенный экономический эффект. Действительно, по сравнению с жилой $d_0=0{,}4$ *мм* применение жил $d_0=0{,}3$ *мм* дает экономию меди около 50%. Если половина объема выпуска всех кабелей будет иметь жилы с $d_0=0{,}3$ *мм*, то по сравнению с $d_0=0{,}4$ *мм* экономия меди по ГТС в целом составит около 25%.

В рассмотренном в настоящем параграфе примере выбиралась номенклатура кабелей АЛ ГТС по диаметру жил. Аналогичным образом может быть выбрана номенклатура и по другим параметрам, а также для других типов сетей. В самом общем случае может быть совместно выбрана номенклатура как станционных, так и линейных сооружений при оптимальных параметрах оборудования.

◆

максимально возможную длину АЛ для каждой зоны: $l_{R_1} < l_{R_2} < l_{R_3}$.

Величины d_{0i} или l_{R_i} (i — номера зон, $i=1, 2, 3$) будем рассматривать как независимые переменные — оптимизируемые параметры, а в качестве целевой функции — критерия оптимальности—выберем вес меди или ее стоимость для всех АЛ района.

Для решения рассматриваемой задачи в соответствии с первым ур-нием (1.8) необходимо выразить суммарные затраты на медь (или вес меди) для всех АЛ в функции d_{0i} или l_{Ri}, взять частные производные и, приравняв их нулю, определить оптимальные диаметры жил. Указанные затраты могут быть выражены в виде суммы:

$$M_{\text{ж}} = \sum_{i=1}^{3} L_i M_{\text{ж}i}, \qquad (3.31)$$

где L_i — суммарная протяженность АЛ к абонентам i-й зоны; $M_{\text{ж}i}$— стоимость меди на единицу длины АЛ с диаметром d_{0i}.

В рассматриваемом районе выделим кольцо радиальной толщиной dl_R на расстоянии l_R от центра. Количество абонентов в пределах площади кольца равно $2\pi l_R \nu dl_R$, а суммарная длина линии к абонентам этого кольца равна $2\pi l_R^2 \nu dl_R$. Суммарная длина АЛ ко всем абонентам i-го кольца составляет

$$L_i = \int_{l_{R_{i-1}}}^{l_{R_i}} 2\pi l_R^2 \nu \, dl_R = \frac{2\pi\nu}{3}\left(l_{R_i}^3 - l_{R_{i-1}}^3 \right). \qquad (3.32)$$

Если рассматривать стоимость меди в кабеле в функции только от диаметра неизолированной жилы, то (2.9) можно представить так:

$$M_{\text{ж}i} = u_{\text{ж}}(d_0)\, d_{0i}^2. \qquad (3.33)$$

Для использования выражений (3.32) и (3.33) в сумме (3.31) необходимо выразить L_i и $M_{\text{ж}i}$ через d_{0i} либо через l_{R_i}. Из ф-л (2.19) и (3.4), подставив значения коэффициентов, находим

$$d_{0i} \approx 0{,}22 \sqrt{l_{R_i}}. \qquad (3.34)$$

Подставив (3.34) в (3.33) и объединив коэффициенты, получаем

$$M_{\text{ж}i} \approx l_{R_i} u_{\text{ж}}\left(l_{R_i} \right). \qquad (3.35)$$

А подставляя ф-лы (3.32) и (3.35) в сумму (3.31), с точностью до постоянных множителей получаем выражение

$$M_{\text{ж}} = l_{R_1}^4 + l_{R_2}^4 - l_{R_2} l_{R_1}^3 + l_{R_3}^4 - l_{R_3} l_{R_2}^3. \qquad (3.36)$$

Выражение (3.36) можно рассматривать как функцию двух переменных: l_{R_1} и l_{R_2} (как было указано, l_{R_3} должна быть принята равной максимальной длине АЛ, считавшейся заданной). Взяв частные производные от функции (3.36) по l_{R_1} и l_{R_2} и приравняв их нулю, получаем систему уравнений:

$$l_{R_2} = \frac{4}{3} l_{R_1}, \quad l_{R_2}^2 (4 l_{R_2} - 3 l_{R_3}) = l_{R_1}^3 \qquad (3.37)$$

трудняется поиск оптимальных значений параметров. Между тем в ряде конкретных задач, выдвигаемых практикой проектирования и конструирования, обычно можно выделить ограниченное количество оптимизируемых параметров и влияющих на них факторов, учет которых имеет решающее значение. Поэтому при решении задач технико-экономической оптимизации кабельных линий связи становится целесообразным выделить и рассмотреть ряд характерных частных случаев для сетей дальней и местной связи, выбор которых подсказывается требованиями практики проектирования линий связи.

Отметим два важных требования к оптимизируемым параметрам: совместимость и независимость, т. е. возможность установления в пределах областей определения любого значения каждого из параметров независимо друг от друга.

Наиболее важным требованием к критерию оптимальности является эффективность его с точки зрения достижения конечной цели исследования. При этом для формализации исследований и использования методов математического программирования критерий оптимальности должен быть выражен скалярной величиной, что соответствует единственной общей цели функционирования системы.

К сожалению, в общем случае при решении задач оптимизации оборудования связи четкая формулировка цели исследования и выбор критерия оптимальности представляют определенные трудности. В качестве примера рассмотрим выбор конструкции кабеля из условия получения минимальных затрат на магистраль связи. Если в качестве критерия оптимальности принять стоимость кабеля, то с точки зрения затрат на магистраль в целом этот критерий может оказаться неэффективным, так как затраты на магистраль определяются не только затратами на кабель (которые в этом случае действительно будут минимальными), но и затратами на аппаратуру уплотнения и усиления, вводные устройства, на строительство и пр., а также расходами на эксплуатацию. Поэтому в качестве критерия оптимальности необходимо выбрать не стоимость кабеля, а один обобщенный показатель, относящийся к магистрали в целом и учитывающий все существенные виды затрат и расходов. Как будет показано ниже, в данной задаче в роли обобщенного критерия оптимальности может использоваться показатель приведенных затрат.

Важной представляется возможность количественной оценки критерия оптимальности, позволяющей численно оценить результат исследования. Если для какого-либо параметра нет способа количественного измерения, то применяется так называемый ранговый подход, при котором в соответствие качественному признаку условно (субъективно) ставится некоторое число. В качестве примера рангового подхода можно привести оценку разборчивости речи по слоговой артикуляции.

К критерию оптимальности предъявляются также требования простоты вычисления или измерения. Критерий оптимальности должен иметь физический смысл, что необходимо для интерпретации полученных результатов.

Пользуясь кибернетической и математической моделями системы связи, можно сформулировать определение ее оптимальности: оптимальной с точки зрения некоторого критерия является система, дающая наименьшее (наибольшее) значение принятого критерия оптимальности в областях определения параметров и при заданных ограничениях. Выбор параметров системы, обеспечивающих ее оптимальность, называется оптимизацией системы, а сами параметры при этом — оптимальными.

1.2. Принципы исследования эффективности сооружений связи

Как известно, в общем случае оценка и выбор конструкций и проектных решений в хозяйстве связи производятся на базе комплексного технико-экономического обоснования, предусматривающего анализ и сравнение как технических, так и экономических характеристик объектов.

Технические характеристики могут определяться путем измерения либо расчета по формулам, отражающим существующие физические и технические закономерности. Нормирование их производится соответствующими стандартами, техническими условиями, специальными указаниями и инструкциями. Расчет и обоснование экономической эффективности сооружений связи производится типовыми методиками определения экономической эффективности капитальных вложений [4], рекомендациями Международного консультативного комитета по телефонии и телеграфии (МККТТ) [5], отраслевыми инструкциями и руководствами.

Согласно рекомендациям МККТТ при экономическом сравнении следует учитывать капитальные затраты, связанные с приобретением и владением оборудования, имеющего относительно большой срок службы, и эксплуатационные расходы являющиеся текущими и поэтому выражаемые обычно в виде ежегодных расходов.

Для оценки эффективности капитальных вложений и новой техники в хозяйстве связи рекомендуется система комплексных показателей, имеющих общее народнохозяйственное значение:

— капитальные вложения (затраты), необходимые для осуществления строительства новых средств и сооружений связи или технического перевооружения предприятий связи;

— себестоимость продукции или годовые эксплуатационные расходы на ее производство и содержание соответствующих технических средств связи;

— срок окупаемости и коэффициент экономической эффективности дополнительных капитальных вложений по внедрению новой техники в хозяйстве связи;

— сумма годового экономического эффекта;

— производительность труда;

— расход дефицитных материалов;

— качественные показатели: разборчивость речи, уровень помех, надежность, достоверность, скорость передачи информации и др.

Могут использоваться показатели общие — по объекту в целом и удельные — на единицу продукции (канало-километр).

В зависимости от назначения и условий применения новой техники при сравнении различных проектных вариантов могут использоваться полные показатели, учитывающие по возможности все виды затрат, и сравнительные, учитывающие только те затраты, которые изменяются в рассматриваемых вариантах. Если капитальные вложения по новой технике не являются единовременными затратами, необходимо учитывать разрыв во времени (лаг) между производством различных видов затрат, а также между осуществлением капитальных вложений и получением эффекта.

Эти выводы подтверждаются также анализом существующих систем сельской связи. Как было показано в § 3.3, для аппаратуры КНК-6 ($f_в = 120$ *кгц*) и для ИКМ-12 ($f_{расч} = 350$ *кгц*) $\theta_{опт} \approx 1{,}2 \cdot 10^{-3}$, что достаточно близко к соответствующим значениям на рис. 3.26 [хотя это сравнение и не является правомерным в строгом смысле, поскольку как отводимая на канал ширина полосы частот, так и основные технические принципы аппаратуры КНК-6 и ИКМ-12 существенно отличаются от принятых в предпосылках при выводе выражения (3.30)]. Зная оптимальные величины d_1/d_0, θ, N_0, можно определить и остальные характеристики линейного тракта. При этом порядок расчета практически не отличается от приведенного в § 3.5.

3.7. Определение оптимальной номенклатуры кабелей для абонентских линий ГТС

Во всех рассмотренных выше примерах решения задач оптимизации оборудования связи общность моделей исследуемых объектов ограничивалась отдельной линией или магистралью, вследствие чего параметры, определяемые структурой построения и характеристиками сети связи в целом, принимались заданными. Однако это ограничение не является принципиальным или необходимым условием в рассматриваемой методике оптимизации. В частности, для магистралей коммерческой связи оптимизация параметров оборудования с точки зрения сети связи в целом может производиться на основе системы ур-ний (1.8). Эта же система уравнений может использоваться и для оптимизации характеристик самой сети связи.

В качестве примера исследования более общей модели рассмотрим задачу выбора номенклатуры кабелей для абонентских линий (АЛ) ГТС по диаметру токопроводящих жил d_0. Жилы кабелей ГТС изготовляются из меди, являющейся дефицитным металлом. Возможность уменьшения диаметра жил ограничивается максимально допустимой величиной сопротивления абонентской цепи постоянному току $R_ш$, а следовательно, необходимой дальностью связи.

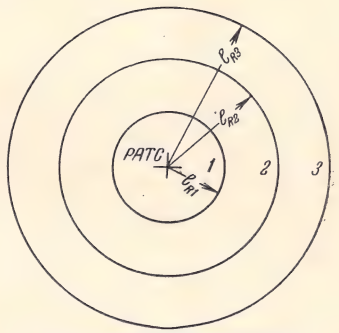

Рис. 3.22. Телефонный район в форме круга и его деление на три зоны: *1, 2, 3.*

Однако абоненты находятся на различном расстоянии от телефонной станции. Очевидно, при выборе диаметра жил, исходя из выполнения норм по $R_ш$ для наиболее удаленного от станции абонента, нормы для остальных АЛ удовлетворяются автоматически. Однако на большинстве АЛ создается излишний запас по сопротивлению шлейфа, что приводит к неоправданному расходу меди. Поэтому на ГТС, как правило, используется несколько (2—4) типов кабеля с различным диаметром жил.

Рассмотрим район с территорией в форме круга, в котором абоненты распределены с равномерной плотностью ν, а районная телефонная станция (РАТС) находится в центре (рис. 3.22). Пусть требуется выбрать для АЛ в трех зонах *1, 2, 3* три различных $d_{01} < d_{02} < d_{03}$. Приняв $R_ш = 1000$ *ом*, из ф-л (2.19) и (3.4) определим

Как показывает анализ выражения (3.27), существуют такие величины переменных N_c и θ, при которых затраты $Q_г^{(1)}$ минимальны.

Объяснение существования минимумов аналогично приведенным в § 3.4 и § 3.5 соображениям.

Взяв частные производные от функции (3.27) по N_c и θ и произведя соответствующие преобразования, получаем выражения, соответствующие второму и третьему уравнениям системы (3.23):

$$\frac{\partial Q_г^{(1)}}{\partial N_c} = \left(\frac{370}{N} N_c \sqrt{N_c} + \frac{424}{N} N_c^2 - 246\sqrt{N_c}\right)\theta^3 -$$

$$-9{,}2\cdot 10^{-4}\left(10 + \frac{\sqrt{N_c}}{2\sqrt{N}}\right)\theta - 4{,}9\cdot 10^{-7}\left(10 + \frac{\sqrt{N_c}}{2\sqrt{N}}\right) = 0, \quad (3.28)$$

$$\frac{\partial Q_г^{(1)}}{\partial \theta} = \left(\frac{740}{N} N_c \sqrt{N_c} + \frac{424}{N} N_c^2 + 492\sqrt{N_c} + 283 N_c\right)\theta^3 -$$

$$-9{,}2\cdot 10^{-4}\left(10 + \frac{\sqrt{N_c}}{\sqrt{N}}\right)\theta - 9{,}7\cdot 10^{-7}\left(10 + \frac{\sqrt{N_c}}{\sqrt{N}}\right) = 0. \quad (3.29)$$

Из совместного решения ур-ний (3.28) и (3.29) могут быть определены оптимальные величины θ и N_c.

Строгий теоретический анализ ур-ний (3.28) и (3.29) представляет определенные трудности. Поэтому для качественного выяснения зависимости между оптимальными величинами N_c и θ целесообразно ввести некоторые упрощения.

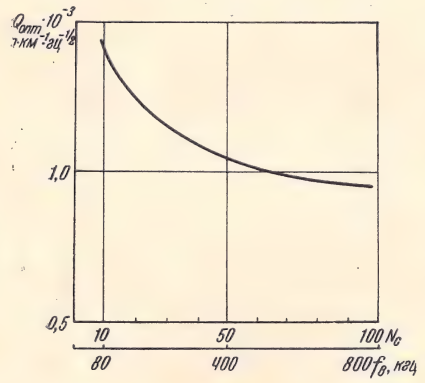

Рис. 3.21. Зависимость оптимальной величины затухания кабеля ($\theta_{опт}$) от диапазона уплотнения линий сельской связи

Как показано в § 3.5, оптимальная мощность системы уплотнения линий СТС может быть принята равной емкости организуемого пучка каналов. Принимая $N_c \approx N$ и вычтя ур-ние (3.28) из (3.29), получаем ориентировочное соотношение для рассматриваемых линий СТС:

$$\theta_{опт} \approx \frac{1{,}7\cdot 10^{-3}}{\sqrt[3]{0{,}3N_c + \sqrt{N_c}}}. \quad (3.30)$$

На рис. 3.21 графически представлена зависимость (3.30). По оси абсцисс наряду с N_c отложена соответствующая ей верхняя частота уплотнения $f_в$. Как видно из графика, на линиях СТС целесообразно применять кабели с достаточно большой величиной коэффициента затухания (для сравнения укажем, что величина θ у цепей кабеля дальней связи типа МКС составляет $0{,}6\cdot 10^{-3}$). С увеличением N_c и соответственно $f_в$ величина $\theta_{опт}$ уменьшается.

Все сравниваемые варианты должны быть приведены в сопоставимый вид по всем признакам, кроме признака, эффективность которого проверяется.

Методы определения и расчета технических параметров и показателей технической эффективности оборудования кабельных линий связи широко освещены в имеющейся технической литературе. Отметим только, что для целей оптимизации качественные характеристики системы связи должны быть выражены через технические параметры системы связи и ее элементов. Менее формализован расчет экономических показателей. Поэтому рассмотрим кратко содержание основных экономических показателей, необходимых для построения математических моделей объектов исследования.

Капитальные затраты на строительство кабельных линий связи складываются из капитальных затрат на линейные и станционные сооружения, а именно:

$$K = K_{ок} + K_э + K_{ОУП} + K_н + K_л, \quad (1.1)$$

где $K_{ок}$, $K_э$, $K_{ОУП}$, $K_н$, $K_л$ — соответственно капитальные затраты на оконечные станции, на электрооборудование оконечных станций, на обслуживаемые усилительные пункты (ОУП), на необслуживаемые усилительные пункты (НУП), на линейные сооружения.

Капитальные затраты на линейные сооружения включают стоимость кабеля, расходы на его прокладку и монтаж, транспортные и прочие расходы (защита от коррозии, защита от влияния линий электропередачи и др.).

Капитальные затраты на станционные сооружения включают стоимость оконечной и промежуточной аппаратуры уплотнения и усиления (совместно с измерительной аппаратурой, оборудованием для служебной связи, телеуправления и сигнализации), стоимость электрооборудования и гражданских производственных сооружений, затраты на монтаж оборудования и прочие затраты на измерения и настройку, начисления и др. Кроме того, в общем случае для решения задач оптимизации показатель капитальных затрат должен включать затраты на разработку и проектирование сооружений и устройств (предпроизводственные затраты).

При проектировании кабельных магистралей капитальные вложения по элементам (статьям) затрат определяются на основе сметно-финансовых расчетов.

Расчет затрат по статьям расходов при разработке новой техники представляет трудную задачу. В этом случае целесообразно применение укрупненных расчетов, при которых отдельные виды (статьи) затрат определяются в процентах от основного вида затрат. При этом составляющие капитальных затрат, входящие в ф-лу (1.1), можно определить следующим образом:

$$\left.\begin{aligned} &K_{ок} = s_а b_а P_а;\ K_э = s_э b_э P_э \\ &K_{ОУП} = n_{ОУП}\left(s_{ОУП}\, b_{ОУП}\, P_{ОУП} + s_{э\,ОУП}\, b_{э\,ОУП}\, P_{э\,ОУП}\right) \\ &K_н = s_н b_н P_н n_н;\ K_л = (P_к + m_к)\, l_м \end{aligned}\right\}. \quad (1.2)$$

где $P_а$, $P_э$, $P_{ОУП}$, $P_{э\,ОУП}$, $P_н$, $P_к$ — соответственно стоимости оконечной аппаратуры уплотнения, электропитающего оборудования

оконечных станций, одного ОУП, электропитающего оборудования одного ОУП, одного НУП, одного километра кабеля; $n_{\text{ПК}}^{\text{О}}$, $n_{\text{н}}$ — количество ОУП и НУП; $l_{\text{м}}$ — протяженность магистрали; $m_{\text{к}}$ — стоимость прокладки и монтажа одного километра кабеля.

Коэффициенты s с соответствующими индексами при основных видах затрат учитывают в укрупненном виде прочие затраты (расходы на монтаж, транспортные расходы и начисления), коэффициенты b с соответствующими индексами — расходы на гражданские сооружения. Аналогичным образом могут быть учтены и другие расходы, если это понадобится для решения той или иной задачи.

Следует иметь в виду, что зависимость тех или иных статей затрат от основных может быть учтена по-разному в зависимости от характера решаемой задачи. Например, при рассмотрении однотипных кабелей, отличающихся лишь количеством жил, стоимость монтажа кабеля может быть принята пропорциональной стоимости кабеля; при сравнении кабелей, отличающихся лишь диаметром жил либо толщиной изоляции, в определенных пределах стоимость монтажа не зависит от стоимости кабеля; наконец, при сравнении кабелей с различным материалом жил (медь, алюминий) стоимость монтажа будет определяться именно материалом.

Комплектация и стоимость источников электропитания с учетом резервирования приближенно принимается одинаковой для одного ОУП и одной оконечной станции.

Для ориентировочной оценки величин коэффициентов b и s при основных видах затрат можно воспользоваться средними данными по соответствующим статьям.

Расходы на монтаж аппаратуры, транспортные расходы и начисления (учитывающие заготовительно-складские расходы и наценку Главснаба) определяются соответствующими ценниками, прейскурантами и нормативами, либо принимаются в процентах от стоимости оборудования (в среднем 10%).

При определении капитальных затрат на гражданские сооружения оконечных станций и промежуточных усилительных пунктов учитываются затраты только на производственные помещения. Для расчета этих затрат используются материалы Гипросвязи по стоимости комплекса гражданских сооружений типового ОУП, а также данные о габаритах и количестве стоечного оборудования и нормативные коэффициенты стоимости одного квадратного или кубического метра производственного здания. При использовании существующих гражданских сооружений, типичных для ОУП и оконечных станций, затраты на приспособление помещений принимаются в размере 15% от стоимости аппаратуры.

Стоимость прокладки и монтажа одного километра кабеля определяется по укрупненным нормативам Гипросвязи в зависимости от способа прокладки и типа кабеля, категории грунта и характера местности. Для однотипных кабелей, прокладываемых в одинаковых условиях, стоимость прокладки можно считать постоянной.

Эксплуатационные расходы представляют собой текущие расходы предприятия на производство продукции и выражают себестоимость продукции в денежной форме.

Годовые эксплуатационные расходы состоят из суммы эксплуатационных расходов на станционные и линейные сооружения и включают затраты на заработную плату производственных работников с начислениями (фонд премирования, твердые надбавки и пр.), расходы на содержание и ремонт оборудования, амортизационные расхо-

соотношение $(d_1/d_0)_{\text{опт}}$ находится в пределах 3÷4 и изменения его при изменении параметров кабеля (в том числе, интересующих нас величин θ и q) весьма незначительны. Поэтому с целью упрощения дальнейших выкладок целесообразно величину d_1/d_0 зафиксировать, так чтобы при допускаемых для той или иной задачи изменениях характеристик кабелей она оставалась в пределах 3÷4. Как следует из § 3.3, этим требованиям удовлетворяет величина $d_1/d_0 \approx 3{,}5$, которую и используем при дальнейших расчетах.

Для составления второго и третьего уравнений системы (3.23) входящие в ф-лу (3.8) члены должны быть выражены в виде функции от θ и $N_{\text{с}}$. Соответствующие зависимости для стоимости НУП задаются выражениями типа (2.66) и (2.62) с учетом соотношений (3.13) и (3.15).

При фиксированной величине d_1/d_0 для расчета стоимости кабеля нет необходимости пользоваться полным выражением (2.53) или (2.70), а достаточно применить более простые формулы, связывающие стоимость кабеля с величинами θ и $q(N_{\text{с}})$ с помощью системы коэффициентов. В частности, для этой цели могла бы быть использована ф-ла (3.14) с учетом зависимости входящих в нее коэффициентов от θ либо $N_{\text{с}}$ — эти величины связаны соотношением (3.15).

Для большинства конструкций кабелей связи величина θ может быть принята независимой от q (это предположение является не совсем точным лишь для малопарных, главным образом, одночетверочных кабелей, где потери в экране выше, чем в многопарных), и для расчета стоимости кабеля может быть предложена формула, по структуре аналогичная ф-ле (2.66):

$$P_{\text{к}}(q,\ \theta) = U_{\text{к}}(q,\ \theta)\left[u'_{\text{к}}(q)\,q + v'_{\text{к}}(q)\sqrt{q}\right]\left[\frac{u'_{\text{к}}(\theta)}{\theta^2} + \frac{v'_{\text{к}}(\theta)}{\theta}\right], \tag{3.24}$$

где $U_{\text{к}}(q,\ \theta)$, $u'_{\text{к}}(q)$, $v'_{\text{к}}(q)$, $u'_{\text{к}}(\theta)$, $v'_{\text{к}}(\theta)$ — коэффициенты, величины которых могут быть рассчитаны в соответствии с выражением (2.53) либо определены из анализа существующих конструкций.

В частности, для рассмотренной выше конструкции кабеля типа КСПП для сельской связи выражение (3.24) принимает вид

$$P_{\text{к}}(q,\ \theta) = 2{,}5\cdot 10^{-3}\,(7q + \sqrt{q})\left(\frac{0{,}53\cdot 10^{-3}}{\theta^2} + \frac{1}{\theta}\right). \tag{3.25}$$

В результате для рассматриваемого случая системы СТС ($\mu=2$, $Q_{\text{ОУП}}=0$, $a_{\text{у}}=48{,}5$ *дб*, $d_1/d_0=3{,}5$) выражение (3.8) может быть записано в виде

$$Q_{\text{г}}^{(1)} = \frac{1}{N}\left\{0{,}275\cdot 2{,}5\cdot 10^{-3}\,(7q + \sqrt{q})\left(\frac{0{,}53\cdot 10^{-3}}{\theta^2} + \frac{1}{\theta}\right) + \right.$$
$$\left. + 0{,}21\cdot 61\,(2{,}46 + \sqrt{2N_{\text{с}}})\left(1{,}5 + \frac{q}{2}\right)\frac{64{,}3\sqrt{2N_{\text{с}}}}{5{,}6}\,\theta\right\}. \tag{3.26}$$

или, варазив q через N и $N_{\text{с}}$ согласно ф-ле (3.13),

$$Q_{\text{г}}^{(1)} = \left\{9{,}2\cdot 10^{-4}\left(\frac{10}{N_{\text{с}}} + \frac{1}{\sqrt{N}}\cdot\frac{1}{\sqrt{N_{\text{с}}}}\right)\left(\frac{0{,}53\cdot 10^{-3}}{\theta^2} + \frac{1}{\theta}\right) + \right.$$
$$\left. + \left(\frac{740}{N}\sqrt{N_{\text{с}}} + \frac{492}{\sqrt{N_{\text{с}}}} + \frac{424}{N}N_{\text{с}} + 283\right)\theta\right\}. \tag{3.27}$$

но, на отечественных сетях СТС основными для высокочастотных линий являются одночетверочные кабели, уплотняемые 6-, 12- и 30-канальной аппаратурой.

3.6. Выбор основных характеристик линейного тракта системы связи

Рассмотренные выше примеры дают представление о порядке применения методики оптимизации магистралей и кабелей связи при решении отдельных частных задач. Однако, как указывалось, достигаемый эффект оказывается тем выше, чем большее количество параметров выбирается одновременно.

Одной из основных задач технико-экономической оптимизации сети связи является выбор характеристик линейного тракта системы связи, так как, главным образом, им определяется экономичность системы связи в целом (как было показано, основанная на одних и тех же технических принципах оконечная аппаратура примерно равноценна по своим технико-экономическим параметрам).

Наибольший интерес будет представлять одновременный выбор конструкции кабеля (d_0, d_1/d_0, α, q) и системы уплотнения (N_c, $f_в$). Можно показать, что из этих переменных независимыми являются всего три параметра, причем уравнения связи задаются приведенными выше формулами.

С точки зрения упрощения математических выкладок и наглядности физической интерпретации целесообразно в качестве независимых переменных выбрать d_1/d_0, α, N_c. Учитывая, что при расчете кабелей связи удобней оперировать с параметром θ вместо α (см. § 3.3. стр. 61), окончательно выбираем независимые переменные: d_1/d_0, θ, N_c.

В качестве исходного по-прежнему применяется сравнительный показатель приведенных затрат $Q_г^{(1)}$, определяемый в общем виде выражением (3.8), однако его члены должны быть выражены через выбранные независимые переменные. Соответствующие зависимости задаются для стоимости кабеля формулами типа (2.70), для стоимости НУП — (2.69), для стоимости ОУП — (2.64) с учетом соотношений (3.13) и (3.15).

Для рассматриваемой задачи система (1.9) имеет вид

$$\frac{\partial Q_г^{(1)}}{\partial\left(\frac{d_1}{d_0}\right)}=0,\quad \frac{\partial Q_г^{(1)}}{\partial\theta}=0,\quad \frac{\partial Q_г^{(1)}}{\partial N_c}=0. \tag{3.23}$$

Эта система может быть дополнена уравнениями, отражающими дополнительные условия и ограничения, например требования определенных частотных характеристик параметров, минимальных габаритов, частотного диапазона и т. п.

Как и в предыдущих параграфах, рассмотрим порядок проведения анализа на конкретных примерах.

Пусть исследуется система сельской связи, для которой имеют место все ограничения, указанные в § 3.5. Рассмотрим подробней систему ур-ний (3.23) для этого случая. Так как переменная d_1/d_0 содержится только в стоимости кабеля, первое уравнение системы (3.23) отвечает анализу конструкции кабеля и отысканию оптимальной величины соотношения d_1/d_0. Эта задача подробно рассмотрена в § 3.3. Как было показано, для кабелей сельской связи оптимальное

ды, транспортные расходы, расходы на электроэнергию, общие расходы (по управлению и обслуживанию производства):

$$C=w_{общ}(W_л l_м+W_{ок})+Y_л l_м+Y_{ок}+A_л K_л+A_{ок}K_{ок}+A_н K_н n_н+$$
$$+\Gamma l_м+G_{ок}+G_н n_н+n_{ОУП}(w_{общ}W_{ОУП}+Y_{ОУП}+A_{ОУП}K_{ОУП}+$$
$$+G_{ОУП}), \tag{1.3}$$

где C — годовые эксплуатационные расходы на магистраль; $W_л$, $W_{ок}$ и $W_{ОУП}$ — годовой фонд заработной платы линейных работников, отнесенный на километр трассы, работников оконечных станций и одного ОУП соответственно; $w_{общ}$ — коэффициент, учитывающий общие расходы; $Y_л$, $Y_{ок}$, $Y_{ОУП}$ — годовые расходы на содержание и ремонт кабельной линии (на километр трассы), оконечной аппаратуры, одного ОУП соответственно; $A_л$, $A_{ок}$, $A_{ОУП}$, $A_н$ — нормы амортизационных отчислений для линейных сооружений, оконечных станций, одного ОУП, одного НУП соответственно; Γ — транспортные расходы на километр трассы; $G_{ок}$, $G_н$, $G_{ОУП}$ — расходы на электроэнергию для питания оконечной аппаратуры, одного НУП, одного ОУП.

Аналогично могут быть учтены, при необходимости, и другие виды и статьи расходов. Как и при расчете капитальных затрат, для ориентировочной оценки отдельных расходов можно воспользоваться средними данными по соответствующим статьям.

Годовой фонд заработной платы исчисляется на основании потребности в производственном штате с включением фонда премирования, а также дополнительной зарплаты и отчислений на социальное страхование в размере 5,3% от суммы заработной платы с учетом премий. Для работников линейной службы отдельно предусматриваются твердые надбавки за разъездной характер работы в размере 20% от должностного оклада.

Расходы на содержание и ремонт кабельной линии и аппаратуры учитывают затраты на материалы и запасные части, и для существующих линий рассчитываются на основе отчетных данных управлений кабельных магистралей, эксплуатационно-технических узлов связи и городских телефонных сетей. Эти же данные могут использоваться как ориентировочные для однотипных новых линий.

Амортизационные отчисления определяются по действующим нормам амортизации, которые установлены для хозрасчетных предприятий связи пропорциональными капитальным затратам на отдельные виды сооружений.

Транспортные расходы определяются приблизительно на основе отчетных данных управлений кабельных магистралей, эксплуатационно-технических узлов, городских телефонных сетей.

Общие расходы для станционных и для линейных сооружений исчисляются в размере 20% от годового фонда зарплаты ($w_{общ}=1{,}2$).

Если известны не все статьи эксплуатационных расходов, то неизвестные статьи рассчитываются приближенно по сложившейся структуре эксплуатационных расходов для однотипного оборудования (либо в среднем по отрасли). При этом за основу берется один

или два вида эксплуатационных расходов, которые могут быть рассчитаны с достаточной точностью, а остальные исчисляются путем умножения основных расходов на соответствующие коэффициенты.

В качестве основных статей эксплуатационных расходов рекомендуются заработная плата производственных работников и амортизационные отчисления. Последние предпочтительней для расчетов оптимизации, так как непосредственно зависят от величины капитальных затрат, которые, в свою очередь, могут быть выражены через параметры кабеля и аппаратуры уплотнения.

Эффективность дополнительных капитальных затрат по внедрению новой техники в хозяйстве связи оценивается сравнительным сроком окупаемости капитальных вложений $T_{со}$ и коэффициентом сравнительной экономической эффективности $E_{сэ}$.

$$T_{со} = \frac{1}{E_{сэ}} = \frac{K_1 - K_2}{C_1 - C_2},$$

где K_1, K_2 и C_1, C_2 — соответственно капитальные затраты и эксплуатационные расходы в сравниваемых вариантах 1 и 2.

Для показателей сравнительной экономической эффективности устанавливаются нормативные значения. В целом по народному хозяйству нормативный коэффициент сравнительной эффективности устанавливается не ниже 0,12 [4], а по отдельным отраслям — в соответствии с отраслевыми инструкциями.

В соответствии с [4] сопоставление вариантов технических решений и решение задач по внедрению новых видов техники производится на основе расчета сравнительной экономической эффективности, показателем которой является минимум приведенных затрат.

Годовые приведенные затраты представляют собой сумму годовых эксплуатационных расходов и капитальных вложений, приведенных к одинаковой размерности в соответствии с нормативом эффективности, а именно:

$$Q_{гп} = C + E_{сэ}K. \qquad (1.4)$$

Приведенные затраты могут быть также отнесены ко всему сроку окупаемости и вычислены по формуле [4]

$$Q_{сп} = K + T_{со}C. \qquad (1.5)$$

Показатель приведенных затрат может применяться как общий — на всю магистраль, так и удельный — на единицу продукции.

Подставляя ф-лы (1.1)—(1.3) в (1.4), определяем показатель удельных годовых приведенных затрат на кабельную магистраль в следующем виде:

$$Q_г = \frac{1}{Nl_м}[\vartheta_а P_а + \vartheta_э P_э + G_{ок} + Y_{ок} + w_{общ}W_{ок} + l_м(Y_л + \Gamma + w_{общ}W_л + \vartheta_к m_к) + n_{ОУП}\, Q_{г\,ОУП} + (\vartheta_н P_н + G_н)\, n_н + \vartheta_к P_к l_м],$$

руб/кан. км·год, (1.6)

ра, количества систем и количества цепей (жил) кабеля — может быть произведено из ф-л (2.58), (2.68), (3.13), используя выражение (3.21):

$$q_{с\,опт} \approx \sqrt{\frac{N}{A_с}};\quad q_{опт} \approx 2\sqrt{\frac{N}{A_с}};$$

$$\Delta_{л\,опт} \approx 8\sqrt{A_с N};\quad f_{в\,опт} \approx 8{,}24\sqrt{A_с N}. \qquad (3.2)$$

На рис. 3.20 сплошными линиями показаны зависимости оптимальных параметров аппаратуры уплотнения, построенные для рассматриваемого примера — линии сельской связи — в соответствии с ф-лами (3.22). Как видно из графика, для сравнительно небольших пучков каналов оптимальная величина $N_{с\,опт}$ оказывается больше N. Поэтому при организации таких пучков выбор оптимальной мощности системы уплотнения является недостижимым. Лучшее, что можно сделать в этом случае — выбрать $N_с = N$. В действительности же приходится выбирать величину $N_с$ еще меньше, так как практически на высокочастотных линиях применяются кабели с минимальной емкостью не менее четверки, вследствие чего приходится распределять организуемый пучок на две системы.

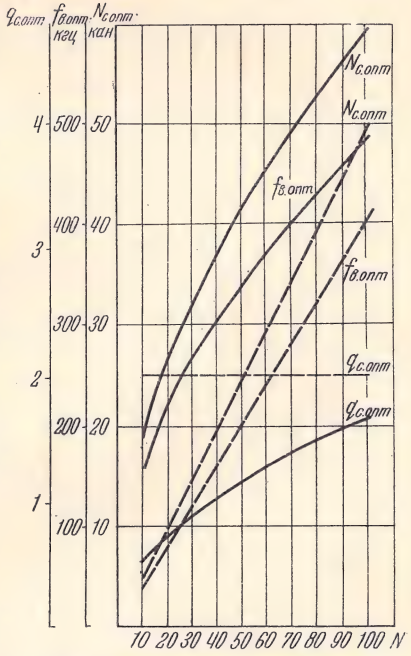

Рис. 3.20. Зависимость оптимальных характеристик аппаратуры уплотнения линий сельской связи от емкости организуемого пучка каналов

Особенностью ф-л (3.22) является возможность получения не кратных количеству четверок, пар и даже жил кабеля — величина q, а также $q_с$, отличающихся от целых чисел, что обусловлено принятым при выводе формул допущением о непрерывном изменении этих величин. Естественно, получаемые по ф-лам (3.22) результаты должны быть округлены соответствующим образом. Соответственно скорректированные характеристики аппаратуры уплотнения изображены на рис. 3.20 штриховыми линиями. Как видно, для организации практически любых встречающихся на линии СТС пучков каналов достаточно применения одночетверочных кабелей.

Таким образом, для высокочастотных линий сельской связи целесообразно использовать малопарные кабели в сочетании со сравнительно мощной аппаратурой уплотнения. Этот вывод соответствует современным тенденциям развития линий сельской связи. Как извест-

Величина $Q_{\text{ОУП}}$ также может быть раскрыта относительно q и $N_{\text{с}}$. Однако, как указывалось, согласно ф-ле (3.13) выражение (3.17) является функцией одной переменной, в качестве которой может быть выбрана любая из двух — $N_{\text{с}}$ или q.

В качестве примера рассмотрим выбор параметров частотной системы уплотнения кабелей сельской связи. Основные особенности этой задачи: отсутствие ОУП ($Q_{\text{ОУП}}=0$), применение однокабельной двухполосной двухпроводной системы связи, $a_{\text{у}}=48{,}5$ *дб* ($\theta=0{,}96\times\times10^{-3}$ *неп·км*$^{-1}\cdot$*гц*$^{-1/2}$)для всех случаев, отводимая на канал полоса $\Delta=4$ *кгц*.

Принимая в выражении (3.17) указанные выше ориентировочные значения коэффициентов, заменяя q в соответствии с ф-лой (3.13) и учитывая, что при двухполосной системе связи $\mu=2$, а вместо $N_{\text{с}}$ надо подставлять $2N_{\text{с}}$, после преобразований и упрощений получаем:

$$Q_{\text{г}}(N_{\text{с}}) \approx \left[\frac{15{,}4}{N_{\text{с}}}+\left(\frac{1{,}55}{\sqrt{N}}+0{,}49\right)\frac{1}{\sqrt{N_{\text{с}}}}+\right.$$

$$\left.+\frac{0{,}74}{N}\sqrt{N_{\text{с}}}+\frac{0{,}425}{N}N_{\text{с}}+0{,}28\right]. \qquad (3.18)$$

Анализ этой формулы показывает, что при некоторой величине $N_{\text{с}}$ затраты на магистраль становятся минимальными. Это объясняется следующим образом. С ростом $N_{\text{с}}$ при $N=\text{const}$, с одной стороны, происходит уменьшение затрат из-за уменьшения количества пар в кабеле и количества усилителей в контейнерах НУП, с другой стороны, вследствие увеличения $f_{\text{в}}$, промежуточные усилители на магистрали должны располагаться чаще, а стоимость каждого усилителя повышается. При определенной величине $N_{\text{с}}=N_{\text{с опт}}(q=q_{\text{опт}})$ суммарные затраты оказываются минимальными.

Для нахождения $N_{\text{с опт}}$ можно применить общий метод: решение уравнения $\frac{\partial Q_{\text{г}}(N_{\text{с}})}{\partial N_{\text{с}}}$. Таким образом, дифференцируя выражение (3.18), получаем

$$N_{\text{с}}^2+1{,}25\sqrt{N_{\text{с}}}-(2{,}56\sqrt{N}+0{,}83N)\sqrt{N_{\text{с}}}-36N=0. \qquad (3.19)$$

Если обозначить $N_{\text{с}}=y^2$, ур-ние (3.19) сводится к алгебраическому уравнению четвертой степени

$$y[y^3+1{,}25y^2-(2{,}56\sqrt{N}+0{,}83N)]=36N, \qquad (3.20)$$

которое нетрудно решить методом итерации.

При имеющих место на СТС соотношениях параметров для ориентировочного определения оптимальной мощности системы уплотнения в левой части (3.20) достаточно ограничиться лишь членом в четвертой степени (в этом легко убедиться простой подстановкой в (3.20) конкретных значений N). Тогда оптимальная мощность системы $N_{\text{с опт}}=6\sqrt{N}$ или в общем виде

$$N_{\text{с опт}}=\sqrt{A_{\text{с}}N}, \qquad (3.21)$$

где $A_{\text{с}}$ — коэффициент, величина которого определяется стоимостными и электрическими характеристиками кабеля и НУП.

Как указывалось, оптимальное определение остальных параметров аппаратуры уплотнения — ширины и расположения линейного спект-

где N — количество каналов, организуемых на магистрали; $Q_{\text{г ОУП}}$ — годовые приведенные затраты на один ОУП;

$$Q_{\text{г ОУП}}=\vartheta_{\text{ОУП}}P_{\text{ОУП}}+\vartheta_{\text{э ОУП}}P_{\text{э ОУП}}+\omega_{\text{общ}}W_{\text{ОУП}}+Y_{\text{ОУП}}+$$

$$+G_{\text{ОУП}};$$

ϑ (с соответствующими индексами) — коэффициенты пропорциональности:

$$\vartheta_{\text{а}}=s_{\text{а}}b_{\text{а}}(E_{\text{сэ}}+A_{\text{ок}});\ \vartheta_{\text{э}}=s_{\text{э}}b_{\text{э}}(E_{\text{сэ}}+A_{\text{ок}});$$

$$\vartheta_{\text{н}}=s_{\text{н}}b_{\text{н}}(E_{\text{сэ}}+A_{\text{н}});\ \vartheta_{\text{к}}=E_{\text{сэ}}+A_{\text{л}};$$

$$\vartheta_{\text{ОУП}}=s_{\text{ОУП}}\,b_{\text{ОУП}}(E_{\text{сэ}}+A_{\text{ОУП}});\ \vartheta_{\text{э ОУП}}=s_{\text{э ОУП}}\,b_{\text{э ОУП}}\times$$

$$\times(E_{\text{сэ}}+A_{\text{ОУП}}).$$

Определение годового экономического эффекта производится путем сопоставления приведенных затрат в сравниваемых вариантах по формуле

$$\Theta=(Q_{\text{г1}}-Q_{\text{г2}})V_{\text{н}}, \qquad (1.7)$$

где $Q_{\text{г1}}$, $Q_{\text{г2}}$ — удельные приведенные затраты по сравниваемым вариантам 1 и 2 (можно взять сравнительные показатели); $V_{\text{н}}$ — годовой объем производимой продукции или производственной работы в натуральных единицах после внедрения мероприятия по новой технике (по второму году внедрения).

Показатели производительности труда по каждому варианту организации связи выражаются через выработку на одного работника основной деятельности. Производительность труда на линиях связи может быть выражена количеством канало-километров, обслуживаемых одним линейным работником при установленной для сравнения протяженности линии (1000 *км*). При решении рассматриваемых в настоящей работе вопросов производительность труда, как правило, можно принять одинаковой для всех вариантов и не учитывать.

При оценке экономической эффективности линейных сооружений связи особо важное значение имеет показатель расхода дефицитных металлов, главным образом, меди и свинца. Расход дефицитных металлов сопоставляют на единицу продукции (канало-километр, номер монтированной емкости сети и т. п.), а также путем исчисления общей экономии как в натуральном, так и в денежном выражении. Следует стремиться к сокращению потребления дефицитных металлов применением наиболее рациональных схем построения сетей, соответствующим выбором конструкций оборудования, заменой дефицитных металлов недефицитными, использованием многоканальной аппаратуры уплотнения.

Качественные показатели связи выражаются через технические параметры каналов.

Приведенные в данном параграфе выражения для расчета основных экономических показателей относятся, главным образом, к ли-

нейным сооружениям дальней связи. Аналогичным образом могут быть рассмотрены технико-экономические показатели для линий ГТС и сельской связи, аппаратуры уплотнения, усиления и коммутации.

1.3. Методика определения оптимальных характеристик магистралей и кабелей связи

Определение оптимальных параметров сооружений связи целесообразно производить на базе общих принципов исследования технико-экономической эффективности капитальных вложений и новой техники в хозяйстве связи. Преимущество такого подхода заключается в возможности использования хорошо разработанной системы комплексных технико-экономических показателей, применяемых при определении экономической эффективности капитальных вложений в народное хозяйство и, в частности, в хозяйство связи. При этом специфической особенностью является использование технико-экономических показателей не по своему прямому назначению — исследованию эффективности того или иного объекта с известными параметрами, а для решения обратной задачи — выбора оптимальных параметров объекта, соответствующих наилучшим технико-экономическим показателям его.

Для нахождения оптимальных в технико-экономическом отношении параметров магистралей и кабелей связи теоретическим путем возникает необходимость в выражении основных технико-экономических показателей исследуемых объектов в виде соответствующих аналитических функций от составляющих их статей затрат, причем формулы должны включать оптимизируемые параметры.

Поскольку проводимые при оптимизации оборудования связи расчеты носят сравнительный характер, появляется возможность использования достаточно приближенных формул без внесения существенных погрешностей в конечные результаты. Действительно, так как одним из основных принципов проведения расчетов является сопоставимость сравниваемых вариантов, порядок погрешностей в случае применения одних и тех же приближенных формул близок по величине, вследствие чего эти погрешности в большинстве случаев могут быть исключены из рассмотрения. Это положение будет проиллюстрировано и подтверждено ниже.

В соответствии с изложенным подходом процесс решения задачи оптимизации кабельных линий связи может включать следующие этапы:

1) постановка задачи, в процессе которой определяется объект исследования, состав выбираемых и задаваемых характеристик — управляемых и неуправляемых параметров, дополнительные условия (ограничения), накладываемые на характеристики, а также формируется критерий оптимальности;

2) построение математической модели, отражающей основные закономерности, имеющие место в исследуемой системе;

3) отыскание решения — определение оптимального проекта, производимое на модели методами математического программирования;

4) проверка и уточнение модели и решения;

5) внедрение результатов исследования, включающее анализ и

слагаемые относительно q и представив все известные величины в виде коэффициентов, а именно:

$$P_{\text{к}} = u_{\text{к}}(q)\, q + v_{\text{к}}(q) \sqrt{q}\,, \tag{3.14}$$

где $u_{\text{к}}(q)$, $v_{\text{к}}(q)$ — коэффициенты, которые могут быть рассчитаны в соответствии с ф-лой (2.14) либо определены из анализа существующих конструкций кабелей. Например, для кабеля сельской связи звездной скрутки с полиэтиленовой изоляцией жил и полиэтиленовой оболочкой ориентировочно можно принять: $u_{\text{к}}(q) \approx 28$ *руб./км*; $v_{\text{к}}(q) \approx 4$ *руб./км*.

Зависимость стоимости НУП $P_{\text{н}}$ от $q_{\text{с}}(q)$ и $f_{\text{в}}(N_{\text{с}})$ описывается ф-лой (2.66). Для систем уплотнения с шириной полосы на канал $\Delta = 4$ *кгц* можно пользоваться непосредственно ф-лой (2.68). Аналогично можно определить соответствующие зависимости для ОУП — $P_{\text{ОУП}}$.

Так как величина α в ф-ле (3.8) зависит от верхней частоты линейного спектра, то необходимо учитывать и зависимость α от $N_{\text{с}}$. В случае высокочастотного симметричного кабеля для этого можно воспользоваться ф-лами (2.41) и (2.68). Однако, учитывая, что по условию задачи величина $\theta = \alpha / \sqrt{f}$ задана, для рассматриваемого случая получаем

$$\alpha = \theta \sqrt{f} = 64{,}3\theta \sqrt{N_{\text{с}}}. \tag{3.15}$$

Например, для кабеля сельской связи типа КСПП-1×4×0,9 можно ориентировочно принять $\theta = 0{,}96 \cdot 10^{-3}$ *неп·км*$^{-1}$·*гц*$^{-1/2}$.

В соответствии с ф-лой (2.72) зависимость величины максимального затухания на верхней частоте линейного спектра, перекрываемого промежуточными усилителями, от мощности системы определяется выражением:

$$a_{\text{у}} = 8{,}7 - \frac{1}{2} \ln N_{\text{с}}. \tag{3.16}$$

При двухполосной системе связи в ф-лах (3.15) и (3.16) вместо $N_{\text{с}}$ необходимо подставлять $2\,N_{\text{с}}$.

Следует, однако, иметь в виду, что для относительно малоканальных систем ГТС и СТС величина $a_{\text{у}}$ может значительно отличаться от вычисленной по ф-ле (3.16). Так, для большинства частотных систем уплотнения кабельных линий сельской связи (системы КНК-6С, КНК-6Т, КНК-12, КРР) величина $a_{\text{у}} = 48{,}5$ *дб*. Однако уже для системы КВ-12 ф-ла (3.16) дает достаточно надежные результаты.

Таким образом, используя ф-лы (3.13)—(3.16), сравнительный показатель приведенных затрат $Q_{\text{г}}^{(1)}$ может быть представлен как функция от q и $N_{\text{с}}$, а именно:

$$Q_{\text{г}}(N_{\text{с}},\, q) = \frac{1}{N} \left\{ \vartheta_{\text{к}} \left(u_{\text{к}}(q)\, q + v_{\text{к}}(q) \sqrt{q} \right) + \left[\vartheta_{\text{н}} U_{\text{н}}(N_{\text{с}},\, q) \times \right.\right.$$

$$\times \left(u_{\text{н}}(N_{\text{с}},\, q) + \sqrt{N_{\text{с}}} \right) \left(v_{\text{н}} \left(N_{\text{с}}, q \right) + \frac{q}{\mu} \right) + G_{\text{н}} \Bigg] \times$$

$$\left. \left. \times \frac{2{,}03\,\theta \sqrt{N_{\text{с}}}}{8{,}7 - \frac{1}{2} \ln N_{\text{с}}} + \frac{Q_{\text{ОУП}}}{R_{\text{до}}} \left(\frac{r}{d_0^2} + r_0 \frac{2{,}03\,\theta \sqrt{N_{\text{с}}}}{8{,}7 - \frac{1}{2} \ln N_{\text{с}}} \right) \right\} \right. . \tag{3.17}$$

Пусть на каком-либо направлении требуется организовать пучок из N каналов. Для организации этого пучка можно использовать системы уплотнения различной мощности, причем

$$N = N_c \frac{q}{\mu} = N_c q_c, \qquad (3.13)$$

где $q_c = q/\mu$ — количество систем, выраженное, как и в ф-ле (2.62), через количество жил кабеля.

Требуемое количество жил может быть получено с помощью одного или нескольких кабелей (соответственно меньшей емкости). Так как с математической точки зрения обе постановки вопроса ничем не отличаются, то, не нарушая общности рассуждений, в дальнейшем изложении будем под q понимать количество жил в одном кабеле. Если же по условиям задачи емкость кабеля фиксируется, то порядок решения остается тем же, но входящие в стоимость кабеля коэффициенты несколько изменяются, отражая зависимость стоимости кабеля, приходящейся на одну цепь, от емкости кабеля и количества кабелей.

Хотя мощность и количество систем уплотнения взаимосвязаны выражением (3.13), при составлении уравнения оптимизации оказывается удобным выявлять их зависимости от различных факторов отдельно, рассматривая N_c и q_c в качестве двух независимых переменных. После составления уравнения переход к одной из этих величин (любой) может быть произведен с помощью (3.13) и уравнение оптимизации преобразуется в уравнение с одной независимой переменной.

Обратимся к выражению (3.7). Как видно, второе и третье слагаемые его $Q_г^{(2)}$ и $Q_г^{(3)}$ не содержат N_c и q. Единственное сомнение может возникнуть по поводу стоимости оконечной аппаратуры $P_а$. Однако было показано (см. § 2.4), что стоимость оконечной аппаратуры, приходящаяся на один канал, не зависит от мощности системы.

В первом слагаемом выражения (3.7) — $Q_г^{(1)}$ величина q содержится в стоимостях кабеля, ОУП и НУП. Что касается N_c, то дело обстоит несколько сложнее. На первый взгляд, эта величина должна входить в стоимость кабеля $P_к$, так как последняя зависит от затухания на верхней частоте диапазона уплотнения, а эта частота, в свою очередь, зависит от мощности системы: чем больше N_c, тем выше $f_в$.

Рассмотрим стоимость кабеля $P_к$, выраженную через N_c ф-лой (2.70). Так как по условию электрические характеристики кабеля заданы, то, следовательно, известна величина затухания на каждой частоте, т. е. $\theta = \alpha/\sqrt{f} = \text{const}$, а высшая частота диапазона уплотнения однозначно связана с мощностью системы. Например, для систем уплотнения симметричных кабелей при полосе, выделяемой на канал, равной 4 *кгц*, эта связь выражается ф-лой (2.68). Поэтому и величина $\alpha/\sqrt{N_c}$ должна считаться константой для заданного типа кабеля. В результате $P_к$ от N_c не зависит.

Так как, за исключением количества жил, все элементы конструкции кабеля считаются заданными, для его расчета нет необходимости пользоваться полными выражениями типа (2.70) или (2.53), а достаточно применить более простую ф-лу (2.14), раскрыв входящие в нее

интерпретацию по отношению к исследуемому объекту полученных на модели выводов и учет соотношений и ограничений, не отраженных в модели. В подобной постановке задача оптимизации может решаться применительно к различным областям науки и техники. В частности, можно назвать работы по оптимизации технических систем вообще (на базе самолетостроения [14], радиосистем [15], систем связи [18]). Конкретное содержание проводимых при выполнении каждого этапа исследований зависит от характера и типа решаемых задач.

Рассмотрим несколько практически важных примеров.

Один из наиболее важных — связь общего пользования.

С технической точки зрения электрические, конструктивные и физико-механические характеристики аппаратуры и кабелей связи должны удовлетворять ряду требований, обусловленных нормами, стандартами, инструкциями и вытекающих из необходимости организации высококачественной надежной связи. Поскольку применение не удовлетворяющего нормам оборудования недопустимо, не соответствующие этим требованиям варианты вообще должны быть исключены из рассмотрения. С другой стороны, улучшение технических показателей оборудования по сравнению с нормами и требованиями конкретной задачи хотя и желательно, но целесообразно только в случае экономической обоснованности. Очевидно, в этом случае технические характеристики оборудования должны выступать в роли ограничений.

Так как в общем случае можно предложить несколько конструкций оборудования (существующих или разрабатываемых), в той или иной мере удовлетворяющих указанной выше обязательной группе требований, критерием при сравнении этих вариантов должна служить их сравнительная экономическая эффективность, причем существенное значение может иметь и степень выполнения технических требований.

В рассматриваемом случае для сети связи общего пользования в качестве обобщенного критерия сравнительной экономической эффективности следует использовать показатель приведенных затрат [4], который объединяет, с учетом срока окупаемости, капитальные вложения и эксплуатационные расходы и, таким образом, наиболее полно отражает основные экономические свойства исследуемого объекта. При этом оптимальными будут являться параметры, обеспечивающие наименьшую величину приведенных затрат при ограничениях, определяемых предъявляемыми техническими требованиями.

При необходимости в качестве критерия оптимальности могут использоваться и другие показатели.

Другой пример — разработка образцов принципиально нового оборудования.

Например, на первой фазе разработки принципиально нового оборудования часто наиболее важным является доказательство возможности реализации заложенных в конструкцию идей, в то время, как экономические показатели могут выступать в роли ограничений. В частности, при создании первых образцов аппаратуры уплотнения с импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ) основное требование заключалось в достижении качественных характеристик каналов, сравнимых с характеристиками каналов у частотных систем, в то время как стоимость аппаратуры не должна была превышать некоторой величины, весьма большой, по сравнению со стоимостью серийно выпускаемых частотных систем.

В то же время при сравнении различных вариантов серийной аппаратуры с ИКМ, имеющих примерно равноценные технические характеристики, на первое место опять выступают экономические показатели. Возможны и другие постановки задач.

Вообще в процессе проведения той или иной разработки в зависимости от изменения условий задачи и целей исследования может изменяться и применяемый критерий оптимальности.

Выбор независимых переменных — оптимизируемых параметров представляет собой не такую простую задачу, как может показаться на первый взгляд. Поскольку большинство параметров оборудования связано между собой аналитическими зависимостями, в качестве независимых переменных в общем случае могут использоваться любые из взаимосвязанных параметров. Если, например, диаметр неизолированной жилы кабельной цепи задан (является константой), то при необходимости рассмотрения в качестве независимой переменной толщины изоляции жилы в соответствующую математическую модель может подставляться как непосредственно эта толщина, так и диаметр изолированной жилы. Поэтому выбор оптимизируемых параметров нужно производить с учетом получения возможно более простой и удобной математической модели объекта исследования.

Поскольку при поиске оптимума должны одновременно выполняться условия, задаваемые уравнениями, описывающими объект исследования, и уравнениями (неравенствами), выражающими дополнительные ограничения, значения оптимизируемых параметров должны определяться из решения соответствующей системы уравнений (неравенств) оптимизации.

Например, для случая сети связи общего пользования в соответствии с изложенным выше получаем:

$$\left.\begin{aligned} &\sum_{i=1}^{\tau} Q_i(x_{i_1}, x_{i_2}, \ldots, x_{in}) = Q_{\text{мин}} \\ &\varphi_i(x_{i_1}, x_{i_2}, \ldots, x_{in}) \gtrless 0, \end{aligned}\right\}, \qquad (1.8)$$

где $Q_i(x_{ij})$ — приведенные затраты для i-й линии; x_{ij} — j-й оптимизируемый параметр i-й линии; $\varphi(x_{ij})$ — уравнение (неравенство) ограничений для i-й линии; в общем случае количество уравнений или неравенств, учитывающих ограничения, может быть достаточно большим.

Система (1.8) представляет собой задачу программирования, чаще всего — задачу нелинейного математического программирования с нелинейным функционалом и нелинейной системой ограничений.

Как известно, наименьшие (наибольшие) значения функции в некотором интервале (области определения) могут находиться на концах интервала, в точках разрыва функции и ее производных, в точках экстремумов. Поэтому для нахождения оптимальных параметров системы связи необходимо исследовать значения функции во всей области определения.

Для рассматриваемых в настоящей работе задач оптимизации целевые функции и их производные, как правило, непрерывны в пределах области определения (см. гл. 3). Поэтому достаточно проверять значения функций лишь на границах области определения и в точках экстремумов.

уплотненного аппаратурой К-120, от коэффициента затухания кабеля при 1,3 *Мгц*, а также соответствующих ему при $D/d_{\text{опт}}$ величин $D_{\text{опт}}$ и $d_{\text{опт}}$. Величина $Q_{\text{г}}^{(1)}$ отнесена к 1 *км* линии и представлена в виде суммы двух слагаемых: $Q_{\text{гн}}^{(1)}$ и $Q_{\text{гк}}^{(1)}$, определяемых стоимостью промежуточного усилительного оборудования (НУП) и стоимостью кабеля соответственно.

При построении графика приняты следующие ориентировочные исходные данные:

— стоимость кабеля принята согласно рис. 3.17 при оптимальных соотношениях D/d;

— стоимость комплекта промежуточного усилительного оборудования на 120 каналов принята 4000 руб.;

— перекрываемое промежуточным усилителем затухание $a_{\text{у}}$ на расчетной частоте 1,3 *Мгц* составляет 32,5 *дб*;

— расчет производится без учета стоимости ОУП.

Как видно из кривых, имеется оптимальная величина коэффициента затухания (диаметров проводников).

Так же, как и при рассмотрении зависимости стоимости кабеля от соотношения диаметров проводников, в этом случае можно допустить некоторое отклонение от оптимальной величины коэффициента затухания. В качестве примера на оси ординат (рис. 3.19) отмечена точка, соответствующая кабелю ВКПП-1×2×2,1/9,4 с коэффициентом затухания 3,25 *дб/км*. Превышение затрат $Q_{\text{р}}^{(1)}$ над минимальными для кабеля ВКПП-1×2,1/9,4 менее 5%.

Аналогичные расчеты можно провести и для других конструкций кабеля и типов аппаратуры, причем анализ соответствующих выражений производится так же, как и для рассмотренного выше случая симметричного кабеля.

3.5. Выбор основных характеристик аппаратуры уплотнения при заданной конструкции кабеля связи

Если заданы электрические характеристики кабеля связи и емкость организуемого пучка каналов, то при конструировании или выборе аппаратуры уплотнения целесообразно определить соотношение между мощностью и количеством систем уплотнения, а остальные характеристики аппаратуры — ширина и расположение спектра, количество цепей кабеля — могут быть найдены из приведенных выше соотношений. В зависимости от конкретных условий конструирования и проектирования может быть предложена различная по полноте раскрытия проблемы постановка этой задачи.

Изложенная в настоящей работе методика принципиально позволяет решать подобные задачи в общем виде. Как и при рассмотрении кабелей связи, исходным для анализа основных характеристик аппаратуры уплотнения является выражение типа (3.7) для приведенных затрат на магистраль, составленное, конечно, с учетом специфических особенностей решаемой задачи.

Если заданы способ модуляции, метод образования линейного спектра и полоса частот, отводимая на канал, то параметры, подлежащие определению, взаимосвязаны (см. § 2.4).

Величина оптимального соотношения D/d в коаксиальных кабелях зависит от стоимости внешних проводников и наружных покровов коаксиальной цепи и всего кабеля в целом.

Расчеты показывают, что чем больше стоимость внешнего проводника, тем меньше величина оптимального соотношения диаметров внешнего и внутреннего проводников.

Как известно, для коаксиального кабеля существенное значение имеет величина волнового сопротивления, которая также определяется соотношением D/d и, как правило, принимается равной 75 *ом*. Расчеты показывают, что обычно величина D/d, найденная из условия $Z_в = 75$ *ом*, незначительно отличается от оптимальной. Поэтому D/d чаще всего целесообразно выбирать, исходя из заданной величины $Z_в$. Однако при этом необходимо производить проверку технико-

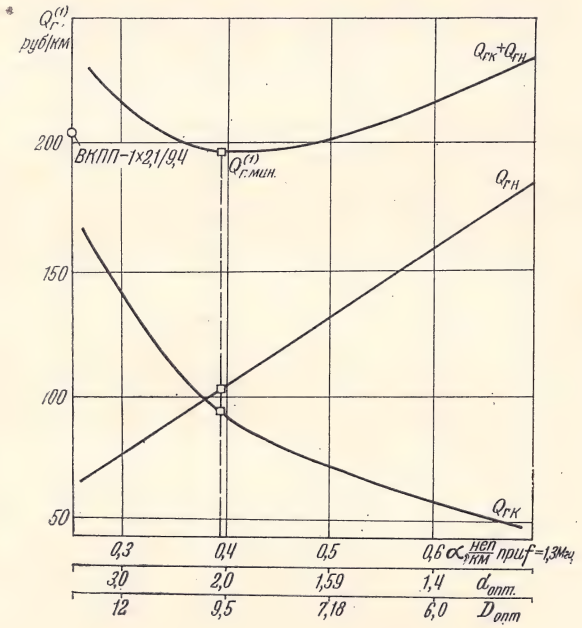

Рис. 3.19. Зависимость показателя сравнительных приведенных затрат на магистраль зоновой связи с однокоаксиальным кабелем, уплотненным аппаратурой К-120, от коэффициента затухания цепи:
□ — экономически оптимальная конструкция кабеля; ○ — существующая конструкция — кабель ВКПП-1×2,1/9,4

экономической оптимальности, поскольку в общем случае отклонение от $D/d_{опт}$ может привести к значительному удорожанию кабеля.

Выбор оптимальной величины коэффициента затухания коаксиального кабеля может производиться аналогично симметричному путем решения второго уравнения системы (3.11).

На рис. 3.19 приведена кривая зависимости величины первого слагаемого выражения (3.7) для однокоаксиального кабеля без троса,

Как известно [9], отыскание экстремумов функции многих переменных осуществляется путем решения системы уравнений, получаемых приравниванием нулю соответствующих частных производных. При этом система (1.8) сводится к решению системы

$$\left.\begin{aligned} &\frac{\partial \sum Q_i(x_{ij})}{\partial x_{ij}} = 0 \\ &\varphi_i(x_{ij}) \gtrless 0 \end{aligned}\right\}. \qquad (1.9)$$

В этом случае задача оптимизации сводится к нахождению условного экстремума.

Нахождение условных экстремумов может производиться методом множителей Лагранжа, либо путем исключения переменных по количеству уравнений связи. Если задаваемая уравнением связи зависимость является явной относительно подлежащих исключению переменных, второй способ часто оказывается проще. В этом случае исследуемая функция может рассматриваться как функция оставшихся переменных, а нахождение экстремумов производится обычным путем, как если бы эти переменные были независимыми.

В общем случае задачи оптимизации кабельных линий связи могут приводить к анализу моделей различных типов: детерминированных и вероятностных, непрерывных и дискретных, с функциональными ограничениями на параметры и др. При этом решение задачи осуществляется современными методами математического программирования, регулярными и случайными методами поиска экстремума.

Ввиду того, что величина приведенных затрат на кабельную магистраль связи может быть задана выражением типа (1.6), используя его в системах (1.8), (1.9), можно определять оптимальные соотношения для любых элементов кабельной магистрали (в том числе конструкции кабеля и аппаратуры, свойств применяемых материалов и полуфабрикатов, различных видов затрат и расходов и др.). Для этого достаточно раскрыть в ф-ле (1.6) зависимости отдельных слагаемых от оптимизируемых параметров, которые должны рассматриваться в качестве независимых переменных.

✦

2. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ ОСНОВНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ СООРУЖЕНИЙ СВЯЗИ

2.1. Принципы укрупненного расчета стоимости оборудования связи

Стоимость нового оборудования определяется величиной прямых производственных затрат на его изготовление и косвенных затрат — накладных расходов и соответствующих плановых начислений. Цены на изделия новой техники рассчитываются в соответствии с имеющимися инструкциями, учитывающими конкретные особенности продукции.

При серийном производстве оптовая цена на новое оборудование связи рассчитывается по формуле

$$P = C_{пл}(1 + E_{пл}), \qquad (2.1)$$

где $C_{пл}$ — плановая себестоимость изделия; $E_{пл}$ — плановый норматив рентабельности.

Плановая себестоимость изделия является основой цены и может быть определена из выражения [1]):

$$C_{пл} = [M + П + W_п(1 + \alpha_н)](1 + \beta_н), \qquad (2.2)$$

где M — стоимость основных материалов; $П$ — стоимость покупных изделий и полуфабрикатов; $W_п$ — основная заработная плата производственных работников. Косвенные затраты учитываются соответствующими коэффициентами: $\alpha_н$ — коэффициент накладных расходов (цеховых и общезаводских), пропорциональных заработной плате производственных работников; $\beta_н$ — коэффициент внепроизводственных расходов, пропорциональных заводской себестоимости.

В стоимость основных материалов входят только материалы, используемые на изготовление деталей собственного производства. Стоимость материала, расходуемого на изготовление деталей одного наименования, исчисляется умножением количества одинаковых деталей на норму расхода материала и на оптовую цену материала. Суммирование полученных результатов по всему перечню деталей составляет общую стоимость материалов, к которой прибавляются транспортно-заготовительные расходы в размере 5—10% и вычитается стоимость реализуемых отходов в размере около 2% от стоимости материалов. При укрупненных расчетах определяются затраты только на наиболее дорогостоящие детали, а стоимость остальных оценивается приближенно.

[1]) С 1971 г. действуют новые «Основные положения по планированию, учету и калькулированию себестоимости продукции на промышленных предприятиях».

представляет проведение исследований при $D = \text{const}$. Следует отметить, что, задавшись величиной $D = \text{const}$, мы тем самым ограничили снизу область возможных значений коэффициента затухания цепи величиной $\alpha_{мин}$, которую можно определить из выражения (2.48) при $D/d = 3{,}6$ и $d = D/3{,}6$. При этом размеры и стоимость внешнего проводника будут минимальны.

Однако поскольку стоимость коаксиальной пары определяется, в первую очередь, суммой стоимости внешнего проводника (с учетом его толщины и экрана) и стоимости внутреннего проводника, суммарная стоимость проводников совсем не обязательно должна быть минимальной при $D/d = 3{,}6$.

На рис. 3.17 приведено семейство кривых — зависимости стоимости ($\varkappa = 1{,}5$) однокоаксиального кабеля с пористой полиэтиленовой изоляцией ($\varepsilon_э = 1{,}5$) с медными проводниками. Поверх внешнего проводника толщиной $t \approx 0{,}25$ *мм* наложен экран из двух стальных лент толщиной $2 \times 0{,}15$ *мм* ($p_э = 0{,}81$ *руб./кг*), полиэтиленовая лента толщиной 0,4 *мм*, алюминиевый экран толщиной 0,15 *мм* и полиэтиленовая оболочка толщиной 2,2 *мм*. Удельные характеристики материалов приняты такими же, как и для рассмотренного выше симметричного кабеля. Кривые построены для различных величин θ (в частности, $\theta = 3{,}3 \cdot 10^{-4}$ *неп·км*$^{-1}$*гц*$^{-1/2}$ соответствует коэффициенту затухания кабеля ВКПП-1×2,1/9,4, равному 3,25 *дб/км* при частоте 1,3 *Мгц*). При значениях $D/d = 4 \div 5{,}5$ кривые $P_к$ имеют минимумы, а соответствующие им отношения D/d и будут оптимальными для рассматриваемой конструкции кабеля. Как видно из рис. 3.17, конструкция выпускающегося промышленностью кабеля ВКПП-1×2,1/9,4 (в котором выбрано $D/d = 4{,}48$ с целью получения $Z_в = 75$ *ом*) близка к оптимальной.

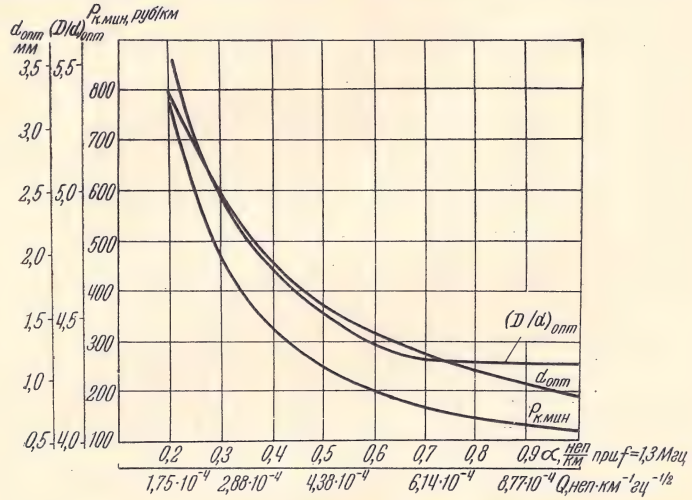

Рис. 3.18. Зависимость оптимальных параметров однокоаксиального кабеля от коэффициента затухания θ, *неп·км*$^{-1}$·*гц*$^{-1/2}$

Оптимальные величины диаметров проводников и стоимости кабеля в зависимости от θ приведены на рис. 3.18.

показывает, что, так же как и для симметричных кабелей, зависимость стоимости кабеля от соотношения диаметров внутреннего и внешнего проводников при заданной величине коэффициента затухания (α=const) имеет ясно выраженный минимум. Объяснение этого явления аналогично такому же явлению для симметричной цепи, рассмотренной выше. Однако специфические свойства коаксиальных цепей приводят к ряду существенных особенностей.

Остановимся предварительно на особенностях зависимости коэффициента затухания кабельной цепи от ее основных размеров: внутреннего диаметра внешнего проводника D и диаметра внутреннего проводника d. Увеличение D при d=const приводит к непрерывному увеличению индуктивности L и уменьшению сопротивления R и емкости C_p цепи, так что при этом величина коэффициента затухания ($\alpha=\alpha_R$) непрерывно уменьшается, что видно из выражения (2.17).

В то же время увеличение d при D=const приводит к более сложной и интересной зависимости затухания. При этом непрерывно уменьшаются R и L цепи, а C_p увеличивается.

В результате зависимость α от d при D=const имеет минимум (для медных проводников при D/d=3,6).

Пусть требуется сконструировать коаксиальную цепь с заданной величиной коэффициента затухания (θ=const). В соответствии с вышеизложенным заданная величина коэффициента затухания может

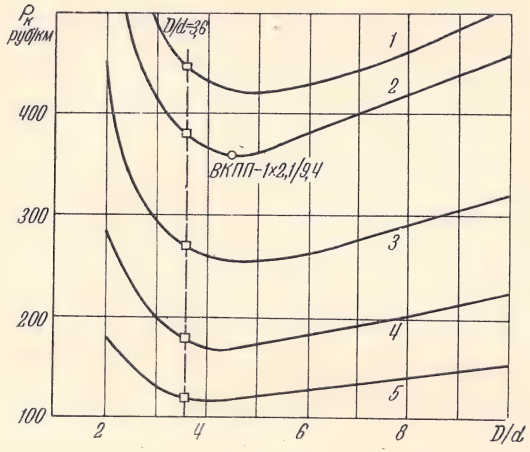

Рис. 3.17. Зависимость стоимости однокоаксиального кабеля от соотношения диаметров внешнего и внутреннего проводников:

кривые *1—5* при $\theta=2{,}88\cdot10^{-4}$; $3{,}3\cdot10^{-4}$; $4{,}38\times10^{-4}$; $6{,}14\cdot10^{-4}$; $8{,}77\cdot10^{-4}$ $неп\cdot км^{-1}\cdot гц^{-1/2}$ соответственно;

□ — кабель с внешним проводником минимальной стоимости; ○ — существующая конструкция — кабель типа ВКПП-1×2,1/9,4.

быть достигнута путем изменения D/d при D=const, или при d=const. Вообще говоря, оба эти способа расчета конструкции эквивалентны. Однако поскольку при d=const функция $\alpha=\varphi(D/d)$ монотонна, то там минимума не возникает. Поэтому больший интерес

Стоимость покупных изделий и полуфабрикатов (ламп, полупроводников, реле конденсаторов и др.) определяется с учетом 3—5-процентной надбавки на транспортно-заготовительные расходы.

В основную заработную плату входит только заработная плата производственных рабочих, принимающих непосредственное участие в технологическом процессе изготовления изделия. Заработная плата может быть рассчитана пооперационно, подетально и по видам работ. Последний метод является наиболее укрупненным.

Цеховые расходы связаны с организацией и обслуживанием производства, зависят от степени механизации и автоматизации производственных процессов.

Общезаводские расходы учитывают затраты на содержание заводоуправления, удовлетворение общепроизводственных нужд предприятия.

Вновь разрабатываемое оборудование связи, отличающееся от серийных изделий отдельными технико-экономическими параметрами, по методам ценообразования может быть отнесено к группе новых изделий известной серии. На стадии научных исследований цены на такие изделия устанавливаются применительно к уровню действующих цен по аналогии с существующими типами оборудования с учетом вносимых в конструкцию изменений. При этом для определения себестоимости и оптовой цены могут использоваться различные методы укрупненных расчетов, из которых наиболее распространенными являются: метод приравнивания удельных весов статей калькуляции, метод расчета по типовой структуре прямых производственных затрат, метод приравнивания стоимости с помощью коэффициентов, метод сравнения со стоимостью подобного оборудования, метод расчета стоимости по удельным затратам на один из конструктивных элементов изделия — полупроводниковый или ламповый прибор, реле и др., а также метод определения себестоимости в зависимости от технико-экономических параметров изделий. При всех методах должна соблюдаться сопоставимость вариантов.

Основанием *метода приравнивания удельных весов* статей калькуляции служит близость структуры себестоимости объектов определенного вида. В качестве базового объекта подбирается конструктивно близкое устройство, разработанное детально и имеющее калькуляцию, составленную методом пооперационного или подетального расчета. Оценку себестоимости производят путем сравнения по удельному весу статей расходов проектируемого и базового объектов, причем величина себестоимости определяется не по всем статьям калькуляции, а по одной, наиболее важной, в качестве которой чаще всего используется стоимость покупных полуфабрикатов. В этом случае

$$C_{пл}=100П/У_п, \qquad (2.3)$$

где $У_п$ — удельный вес покупных полуфабрикатов в себестоимости изделия, %.

Из полученной таким путем себестоимости могут быть определены другие элементы затрат.

Метод расчета по типовой структуре прямых производственных затрат применим для однотипного оборудования. Для этого подбирается определенная структура прямых затрат, затем рассчитывается одна из статей прямых затрат, по которой на основе принятой структуры затрат определяются остальные статьи прямых производственных затрат и себестоимость изделия. Если, например, имеется воз-

можность рассчитать стоимость покупных полуфабрикатов, то стоимость материалов и заработной платы определится из выражений:

$$M = \frac{\Pi}{y_{\text{п}}} y_{\text{м}}, \quad W_{\text{п}} = \frac{\Pi}{y_{\text{п}}} y_{\omega}, \tag{2.4}$$

где $y_{\text{м}}$, $y_{\text{и}}$ — удельный вес основных материалов и заработной платы.

Полная себестоимость определяется по ф-ле (2.2).

Если отсутствует возможность расчета прямых затрат, при определении себестоимости нового оборудования используется *метод приравнивания стоимости с помощью коэффициентов*. Коэффициенты устанавливаются на основе анализа конструктивно-технологических и стоимостных различий сравниваемого оборудования. Например, при прочих равных условиях коэффициент относительной сложности аппаратуры уплотнения в определенном смысле пропорционален количеству полупроводниковых и ламповых приборов, аппаратуры коммутации — пропорционален количеству контактов в координатной сетке коммутации, кабеля — пропорционален количеству пар, каналообразующей аппаратуры — количеству каналов.

Себестоимость вновь разрабатываемого оборудования определяется в виде произведения стоимости прототипа на соответствующий коэффициент.

Метод сравнения со стоимостью подобного оборудования используется, если новое оборудование отличается от существующего сравнительно небольшими конструктивно-технологическими изменениями. При этом в основу расчета может быть положена стоимость изготовления существующего оборудования, уменьшенная на стоимость изготовления изъятых и увеличенная на стоимость изготовления добавочных деталей, узлов и покупных полуфабрикатов.

Метод расчета по удельным затратам на один из конструктивных элементов применим, если в стоимости разрабатываемого оборудования велик «удельный вес» каких-либо однотипных элементов. В качестве такого элемента удобно принимать для аппаратуры коммутации реле, для кабеля — пару, для аппаратуры уплотнения — ламповую схему, фильтр, преобразователь и т. п.

Как видно, расчет стоимости оборудования так или иначе связан с определением некоторой системы коэффициентов и возникает задача нахождения численных значений этих коэффициентов для различных конкретных случаев. При этом принципиально возможны два пути: теоретический расчет коэффициентов, базирующийся на использовании аналитических зависимостей, либо статистический подход, основанный на анализе свойств существующих конструкций. Выбор способа определения коэффициентов зависит от условий решаемой задачи, наличия аналогов среди существующего оборудования, самих выясняемых закономерностей. Кроме того, оба указанных способа обладают некоторой погрешностью: теоретический — вследствие различного рода допущений и упрощений, принимаемых при выводе соответствующих зависимостей, статистический—из-за влияния факторов, не всегда вытекающих из свойств изучаемого объекта (различие технологии на отдельных предприятиях, колебания цен, конъюнктурные соображения и т. д.). Поэтому в ходе технико-экономических исследований целесообразно применять одновременно оба способа определения коэффициентов с взаимной проверкой результатов. Этот прием будет широко использован в приводимых ниже исследованиях.

дящих через начало координат. Такие прямые полностью характеризуются тангенсом угла наклона $\operatorname{tg}\varphi_\alpha = \frac{\alpha}{\sqrt{f}} = \theta$ [см. стр. 66, ф-лу (3.12)]. Для их построения достаточно задаться одной точкой, т. е. величиной α на одной (любой) частоте. При конструировании кабелей связи заданную частотную характеристику коэффициента затухания можно получить в основном путем выбора d_0 и d_1/d_0. Причем достаточно правильно выбрать один из указанных параметров.

В качестве примера рассмотрим случай конструирования одночетверочного кабеля (ψ=0,69) с медными жилами, сплошной полиэтиленовой изоляцией ($\varepsilon_э$=2,1) и алюминиевым экраном ($R_э$=8,1 *ом/км*), с частотной характеристикой коэффициента затухания на высоких частотах, аналогичной характеристике кабеля МКС-4×4×1,2 ($\operatorname{tg}\varphi_\alpha$=0,62). На рис. 3.16 представлена зависимость между d_0 и d_1/d_0 для рассматриваемого кабеля.

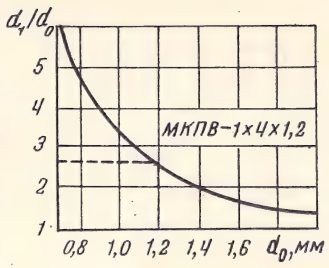

Рис. 3.16. Соотношения конструктивных параметров цепей одночетверочного кабеля с медными жилами, полиэтиленовой изоляцией и алюминиевым экраном при заданной форме частотной характеристики коэффициента затухания ($\operatorname{tg}\varphi_\alpha$=0,62).

Как видно, при d_0=1,2 *мм*, соотношение $d_1/d_0 \approx 2{,}8$ — величина, близкая к соотношению для кабеля типа МКПВ-1×4×1,2 (частотные характеристики коэффициента затухания кабелей МКПВ-1×4×1,2 и МКС-4×4×1,2 отличаются незначительно).

Если помимо наклона частотной характеристики коэффициента затухания задается величина волнового сопротивления, то оба эти условия можно удовлетворить выбором величин d_0 и d_1/d_0.

В соответствии с выражением (2.43) на достаточно высоких частотах величина $Z_{\text{в}}$ обусловливает соотношение d_1/d_0.

Если при конструировании кабеля типа МКПВ-1×4 задаться условием получения частотной характеристики коэффициента затухания и волнового сопротивления, аналогичных кабелю МКС-4×4×1,2 ($Z_{\text{в}}$=116,7 *ом*, $\operatorname{tg}\varphi_\alpha$=0,62), то для кабеля МКПВ-1×4 из ф-лы (2.43) найдем d_1/d_0=3,7, а из ф-л (2.41) или (2.50) или из рис. 3.16 — d_0=0,93 *мм*.

Таким образом, из различных требований, предъявляемых к характеристикам высокочастотных симметричных кабелей связи при заданном типе аппаратуры уплотнения, практически можно выполнить только два.

3.4. Особенности выбора параметров цепей коаксиальных кабелей связи

Технико-экономический анализ конструкции коаксиальных кабелей связи проводится принципиально так же, как и высокочастотных симметричных кабелей. Поэтому ниже будут рассмотрены лишь основные особенности выбора параметров коаксиального кабеля, обусловленные специфическими свойствами коаксиальных цепей.

Анализ выражения (2.55) для стоимости коаксиального кабеля

же время, как было показано, для рассматриваемого случая задается полная система ур-ний (3.6), причем в реальных условиях эта система может быть дополнена также уравнениями, учитывающими заданные требования к надежности кабеля, накладываемые на отдельные элементы конструкции ограничения и т. д.

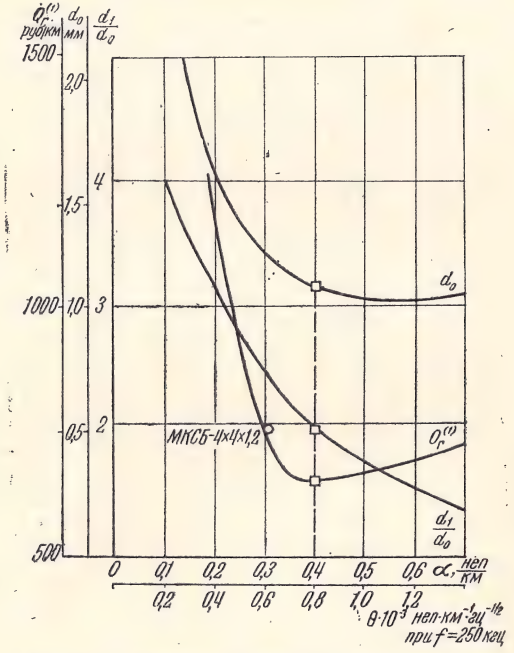

Рис. 3.15. Зависимость характеристик линии дальней связи из четырехчетверочного кабеля, уплотненного аппаратурой К-60, от величины коэффициента затухания $\theta \cdot 10^{-3}$ *неп · км* $^{-1}$ *. гц*$^{-1/2}$ при частоте f=250 *кгц*:
□ — экономически оптимальные значения;
○ — затраты на магистрали с кабелем существующей конструкции — МКСБ-4×4×1,2

Очевидно, выполнение таких дополнительных требований возможно только за счет одного или обоих ур-ний (3.11).

Методы расчета конструкций цепей высокочастотных кабелей под заданные параметры передачи (α, $Z_в$) аналогичны рассмотренным выше для низкочастотных кабелей. Однако особенностью является необходимость выдерживания частотных характеристик, заданных в диапазоне частот. Соответствующие аналитические зависимости для симметричных высокочастотных цепей задаются ф-лами (2.41), (2.42), (2.43), (2.46), (2.47).

Наибольший интерес представляет расчет цепей под заданную характеристику коэффициента затухания. Если рассматривать коэффициент затухания как функцию от $\sqrt{f}$, то каждое из выражений (2.41), (2.42), (2.46) представляет собой уравнения прямых, прохо-

2.2. Зависимость стоимости кабелей связи от конструктивных характеристик

Общие замечания

Конструкции кабелей связи определяются назначением, условиями применения, прокладки и эксплуатации и отличаются материалом токопроводящих жил и изоляции, конструкцией цепей и внешних защитных покровов.

Определение стоимости различных типов кабелей — коаксиальных и симметричных, многопарных и малопарных, звездной и парной скрутки и т. д. — имеет ряд характерных особенностей. Расчет стоимости кабелей связи может производиться в соответствии с вышеизложенными принципами укрупненных расчетов.

Например, в работе [5] для расчета стоимости кабеля по количеству жил рекомендуется выражение, соответствующее методу расчета по удельным затратам на одну жилу, а именно:

$$P_к(q) = u_к(q) + q v_к(q), \qquad (2.5)$$

где q — количество жил в кабеле; $u_к(q)$ и $v_к(q)$ — коэффициенты[1])

Выражения типа (2.5) обычно основаны на эмпирических соотношениях и, как будет показано, достаточно точны лишь для кабелей с большим количеством жил (например, кабели ГТС). Основным недостатком таких выражений с точки зрения оптимизации конструкции кабеля является отсутствие явно выраженной зависимости стоимости от конструктивных параметров кабеля, оказывающих существенное влияние на его экономичность.

Как показывает анализ существующих конструкций, себестоимость кабеля определяется в основном стоимостью основных материалов, причем «удельный вес» покупных полуфабрикатов весьма незначителен, так что этой статьей затрат можно пренебречь ($П = 0$), отнеся соответствующие ей расходы к стоимости основных материалов. В этом случае себестоимость кабеля можно определить из выражения (2.2):

$$C_к = [M + W_п(1 + \alpha_и)][1 + \beta_н]. \qquad (2.6)$$

Определение стоимости кабеля при решении задачи его оптимизации наиболее целесообразно производить методом приравнивания удельных весов статей калькуляции либо по типовой структуре прямых производственных затрат, задаваясь стоимостью основных материалов, так как, главным образом, эти затраты изменяются при изменении конструкции кабеля, а их «удельный вес» в стоимости кабеля может достигать 60—80%. При этом все статьи прямых производственных затрат выражаются в процентах от стоимости основных материалов. В качестве примера ниже приведена типовая структура затрат на производство кабеля сельской связи с пластмассовой изоляцией и оболочкой, разработанная одним из заводов-изготовителей и ориентировочные коэффициенты затрат по статьям как доля от стоимости основных материалов.

---

[1]) Здесь и далее коэффициенты u и v выражают удельные стоимости соответствующих параметров.

Структура затрат на производство кабеля сельской связи

Статьи затрат	Коэффициенты затрат
Стоимость основных материалов	1,0
Зарплата	0,10
Накладные расходы	0,1
Внепроизводственные расходы	0,02
Итого	≈1,22

Как видно, себестоимость и цена кабеля определяются, главным образом, стоимостью основных материалов, в то время как остальные затраты могут быть учтены с помощью некоторого коэффициента $\varkappa$ (в приведенном примере с учетом планируемой рентабельности $\varkappa \approx 1{,}25$), таким образом, цена кабеля:

$$P_к = \varkappa M. \qquad (2.7)$$

Величина коэффициента $\varkappa$ зависит от ряда факторов: отработанности технологии, автоматизации производства, жесткости допусков и норм, свойств применяемых материалов, организации и производительности труда. Для существующих конструкций она находится в пределах $\varkappa \approx 1{,}2 \div 1{,}6$.

Следует отметить, что решение задачи оптимизации кабелей, как правило, связано с рассмотрением однотипных конструкций, для которых величина $\varkappa$ может быть принята одинаковой.

Стоимость основных материалов кабеля связи можно представить в виде суммы стоимостей его отдельных элементов: жил ($M_ж$), изоляции ($M_и$), экрана ($M_э$), поясной изоляции ($M_пи$), брони $M_бр$, оболочки ($M_об$):

$$M = M_ж + M_э + M_и + M_пи + M_бр + M_об. \qquad (2.8)$$

Кроме того, конструкция кабеля может включать и другие элементы, например джутовые покровы, пластмассовые ленты, стоимость которых может быть учтена аналогичным образом.

В расчетах стоимость материалов выражают в денежных единицах на километр кабеля.

Расчет стоимости симметричного кабеля [1])

Стоимость жил может быть вычислена по формуле

$$M_ж = \chi q \frac{\pi d_0^2}{4} \gamma_ж p_ж, \qquad (2.9)$$

где $\gamma_ж$ — удельный вес материала жил; $p_ж$ — удельная стоимость материала жил, *руб/кг*; χ — коэффициент укрутки, равный обычно 1,01÷1,05; d_0 — диаметр жилы.

Заметим, что стоимость жил зависит также от технологии изготовления применяемого оборудования, производительности труда, материала и размеров жил. Однако при рассмотрении однотипных конструкций роль этих факторов может быть принята одинаковой для всех вариантов и учтена в коэффициенте $\varkappa$. Это же замечание относится и к другим элементам кабеля.

[1]) В расчетах использована общепринятая методика определения конструктивных размеров кабеля [10].

го можно принять одинаковой для обоих типов аппаратуры). В $Q_г^{(2)}$ решающую роль играет стоимость оконечного оборудования. Учитывая, что в соответствии с принятыми данными стоимость оконечного оборудования аппаратуры ИКМ-12 значительно ниже, чем КНК-6Т (поскольку в последнем случае для образования 12 каналов приходится применять два комплекта аппаратуры), а величина $Q_г^{(1)}$ примерно одинакова для обоих типов аппаратуры, следует отдать предпочтение системе с ИКМ. При этом, очевидно, больший экономический эффект будет получаться при связи на короткие расстояния, так как в этом случае расходы на оконечное оборудование имеют больший удельный вес в общей сумме затрат.

Хотя данный пример не является показательным с точки зрения сравнения аппаратуры различной мощности (в нем не выполнено одно из основных условий — сопоставимость вариантов, поскольку сравниваются системы с частотной и с импульсно-кодовой модуляцией), однако, как будет показано, бо́льшая эффективность двенадцатиканальной аппаратуры по сравнению с шестиканальной является отражением общей закономерности, присущей линиям СТС и заключающейся в том, что для организации достаточно больших пучков (до 50—100 каналов) выгоднее системы большей мощности.

Все изложенное остается справедливым и для линий ДС и ЗС, содержащих ОУП, однако в кабелях для этих линий $(d_1/d_0)_{опт}$, как было показано, меньше, чем для кабелей СТС.

В качестве примера на рис. 3.15 приведены зависимости величины $Q_г^{(1)}$ (с учетом ОУП) и величин d_0 и d_1/d_0 для линий ДС и ЗС с аппаратурой К-60 от коэффициента затухания для четырехчетверочного кабеля, аналогичного МКСБ-4×4×1,2 (при частоте 250 *кгц*). Как видно, $d_{0\,опт} = 1{,}1$ *мм* $(d_1/d_0)_{опт} = 2$. На этом же графике отмечена точка, соответствующая затратам $Q_г^{(1)}$ при кабеле существующей конструкции МКСБ-4×4×1,2. Как видно, расходы на организацию и обслуживание магистрали могут быть значительно снижены при оптимальном выборе параметров кабеля.

Как показывает полная калькуляция затрат, проведенная по общепринятой методике и нормативным ценам Гипросвязи, в случае оптимального выбора конструкции кабеля годовая экономия по приведенным затратам составит примерно 80 000 руб. на магистраль протяженностью 1000 *км* при экономии меди около 50 *т*.

Следует отметить, что при определенных условиях в результате расчетов может быть получена весьма малая оптимальная величина соотношения d_1/d_0 (например, при сравнительно большой стоимости ОУП и достаточно малой стоимости НУП, особенно при усилителях на транзисторах). При этом определение вошедших в расчет α (и далее, в расчет соответствующих стоимостей кабеля и аппаратуры) величин $C_р$ и L по ф-лам (2.31) и (2.32) становится недостаточно точным, что может существенно сказаться на правильности выбора характеристик и конструкции кабеля. В этом случае можно рекомендовать использование более точных, хотя и более сложных зависимостей (2.36)—(2.38).

Из изложенного в настоящем параграфе следует, что для выбора двух оптимизируемых параметров — d_1/d_0 и $\alpha(d_0)$ — необходимо использовать оба уравнения системы (3.11). Отсюда вытекает, что, если наряду с экономической оптимальностью к кабелю предъявлять также и другие требования (т. е. стремиться к технико-экономической оптимальности), выполнение их окажется недостижимым. В то

налов — 600 руб. для аппаратуры ИКМ-12 и 1600 руб. для аппаратуры КНК-6Т (2 комплекта усилителей);

— расчетная частота принята 120 *кгц* для аппаратуры КНК-6Т и 350 *кгц* для ИКМ-12;

— перекрываемое промежуточными усилителями затухание a_y на расчетной частоте — 48,5 *дб* для КНК-6Т и 34,6 *дб* для ИКМ-12;

— стоимость электропитания промежуточных усилителей не учитывается.

По оси абсцисс отложены как величина коэффициента затухания $\alpha(\theta)$, так и соответствующий значениям α и θ диаметр жилы d_0, вычисленный согласно ф-ле (2.50) при $(d_1/d_0)_{опт}=3{,}1$.

Как видно из рис. 3.13 и 3.14, имеется минимум показателя $Q_г^{(1)}$ и соответствующая ему оптимальная величина коэффициента затухания (диаметра неизолированной жилы). Примечательно, что оптимальный диаметр неизолированной жилы одинаков как при уплотнении кабеля аппаратурой КНК-6Т, так и ИКМ-12 и составляет $d_{опт}\approx 0{,}55$ *мм*, а $(d_1/d_0)_{опт}\approx 3{,}1$ одинаково для обоих типов аппаратуры.

Для сравнения на оси ординат отмечены точки, соответствующие величине $Q_г^{(1)}$ для магистралей с серийно выпускающимися кабелями типа ВТСП-1×4×1,2 (в полиэтиленовой оболочке) и КСПП-1×4×0,9. Как видно, худшими технико-экономическими показателями обладает магистраль на кабеле ВТСП-1×4×1,2 с толщиной изоляции жил 0,8 *мм* ($d_1/d_0=2{,}33$). Существенная экономия по сравнению с кабелем ВТСП-1×4×1,2 достигается применением кабеля КСПП-1×4×0,9 толщиной изоляции жил 0,7 *мм* ($d_1/d_0=2{,}56$). В то же время, как видно из графиков, имеется возможность дальнейшего значительного уменьшения величины приведенных затрат. Кабель оптимальной конструкции имеет следующие размеры: $d_{0\,опт}=0{,}55$ *мм*, $(d_1/d_0)_{опт}=3{,}1$ (толщина изоляции жил 0,58 *мм*). Применение кабеля оптимальной конструкции позволит также значительно уменьшить расход меди по сравнению с существующими конструкциями. Однако при этом должны быть рассмотрены вопросы дистанционного питания промежуточных усилителей (так как ввиду отсутствия ОУП может снизиться дальность связи) и коррекции частотной характеристики затухания линии предусмотренными в аппаратуре выравнивателями.

Для принятых в примере исходных цифровых данных был рассчитан экономический эффект от применения одночетверочного кабеля сельской связи оптимальной конструкции. Расчет производился по общепринятой методике с калькуляцией всех основных статей затрат и расходов только для линейного тракта.

Как показывают результаты расчета, при годовом выпуске и прокладке 10 000 *км* такого кабеля экономия по приведенным затратам составит более 180 000 руб./год по сравнению с кабелем ВТСП-1×4×1,2 и более 85 000 руб./год по сравнению с кабелем КСПП-1×4×0,9, причем порядок величины экономического эффекта одинаков для аппаратуры КНК-6Т и ИКМ-12. При этом экономия меди составит 318,0 т/год по сравнению с кабелем ВТСП-1×4×1,2 и 142,5 т/год по сравнению с кабелем КСПП-1×4×0,9.

Представляет интерес сравнение эффективности применения аппаратуры уплотнения КНК-6Т и ИКМ-12 на кабеле оптимальной конструкции. Для этого в выражении (3.7) необходимо учитывать первое и второе слагаемые — $Q_г^{(1)}$ и $Q_г^{(2)}$ (величину третьего слагаемо-

Стоимость изоляции жил

$$M_и = \chi q \frac{\pi\left(d_1^2 - d_0^2\right)}{4}\gamma_и\, p_и, \qquad (2.10)$$

где d_1 — диаметр изолированной жилы; $\gamma_и$ — удельный вес изоляции, который для комбинированной изоляции может быть определен с учетом составляющих ее диэлектриков; $p_и$ — удельная стоимость изоляции (с учетом технологии наложения).

Стоимость каждого из внешних защитных покровов (экрана, поясной изоляции, оболочки, брони) определяется в виде

$$M_i = \pi D_i t_i \gamma_i p_i, \qquad (2.11)$$

где D_i, t_i — внешний диаметр и толщина соответствующего (i-го) покрова; γ_i, p_i — удельный вес и удельная стоимость материала покрова.

При однородной повивной кабельной скрутке диаметр сердечника кабеля можно определить через диаметр изолированных жил, тип и количество групп [10]:

$$D_c = F d_{гр};\quad d_{гр} = \zeta_{гр}\, d_1, \qquad (2.12)$$

где $d_{гр}$ — диаметр группы (пары, четверки — рис. 2.1); $\zeta_{гр}$ и F — соответственно коэффициенты скрутки в группу и в повив; для

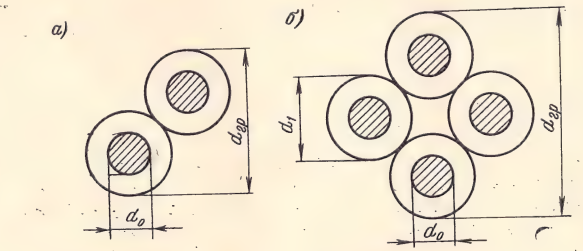

Рис. 2.1. Размеры групп симметричного кабеля:
а) пара; *б)* четверка

звездной скрутки $\zeta_{гр}=2{,}41$, для парной $\xi_{гр}=1{,}71$. Коэффициент F определяется по формуле:

$$F = 2m - 1 + \frac{1}{\sin\dfrac{\pi}{n_1}},$$

где m — количество повивов; n_1 — количество групп в центральном повиве.

Обычно для расчета коэффициента F используют простые формулы (табл. 2.1).

Для решения задач оптимизации кабеля целесообразно иметь в явном виде зависимость коэффициента F от количества жил q (или групп $n_{гр}$) кабеля. Учитывая, что каждый следующий повив содержит на шесть групп больше нижележащего, и пользуясь свойствами арифметической прогрессии, можно записать

$$n_{гр} = \frac{m}{2}[2n_1 + (m-1)6],$$

откуда

$$m = \frac{3 - n_1 + \sqrt{(3-n_1)^2 + 12n_{гр}}}{6}.$$

ТАБЛИЦА 2.1

Формулы для расчета коэффициента F

n_1	F
1	$2m-1$
2	$2m$
3	$2m+0{,}15$
4	$2m+0{,}413$
5	$2m+0{,}7$

Как показывает анализ этих выражений, количество повивов в кабеле почти не зависит от числа групп в центральном повиве. Выбрав $n_1=3$, получаем наиболее простые выражения для F и m:

$$F \approx 2m \text{ и } m \approx \sqrt{\frac{n_{гр}}{3}}.$$

Имея в виду, что общее количество групп в кабеле составляет при звездной скрутке $q/4$ и при парной — $q/2$, получаем соответственно приближенные выражения коэффициентов скрутки в повив:

$$F_{зв} \approx 0{,}6\sqrt{q};\ F_{парн} \approx 0{,}8\sqrt{q}.$$

Начиная с $n_{гр}=3$, погрешность при использовании этих формул для расчета диаметров сердечников кабелей с произвольным количеством групп не превышает 5%, в чем нетрудно убедиться путем сравнения результатов расчета с табличными данными.

Отталкиваясь от выражений (2.1), (2.6), (2.7) и используя ф-лы (2.8)—(2.11), находим стоимость симметричного кабеля в общем случае в зависимости от конструкции, размеров, материала и стоимости отдельных элементов:

$$P_{ск} = \pi d_0^2 \left\{\chi \frac{q}{4}\left[\gamma_ж p_ж + \gamma_и p_и\left(\left(\frac{d_1}{d_0}\right)^2 - 1\right)\right] + F\zeta \times \right.$$

$$\left. \times \left(\frac{d_1}{d_0}\right)\frac{1}{d_0}\sum \gamma_i p_i t_i \left(1 + \frac{D_i - D_c}{F\zeta d_1}\right)\right\}. \qquad (2.13)$$

где выражение под знаком Σ соответствует сумме стоимостей всех внешних покровов кабеля.

Исследование этой зависимости методом частных производных будет проведено ниже при рассмотрении системы связи в целом. Здесь же рассмотрим качественную сторону задачи.

В качестве примера на рис. 3.13 и 3.14 приведены кривые зависимости $Q_г^{(1)}$ как сравнительного показателя приведенных затрат, определяемого выражением (3.8), от коэффициента затухания для рассмотренного выше одночетверочного кабеля (аналогичного кабелю КСПП-1×4) со сплошной полиэтиленовой изоляцией жил, полиэтиленовой поясной изоляцией и оболочкой, уплотненного аппаратурой типа КНК-6Т (рис. 3.13) и ИКМ-12 (рис. 3.14). Стоимость ОУП

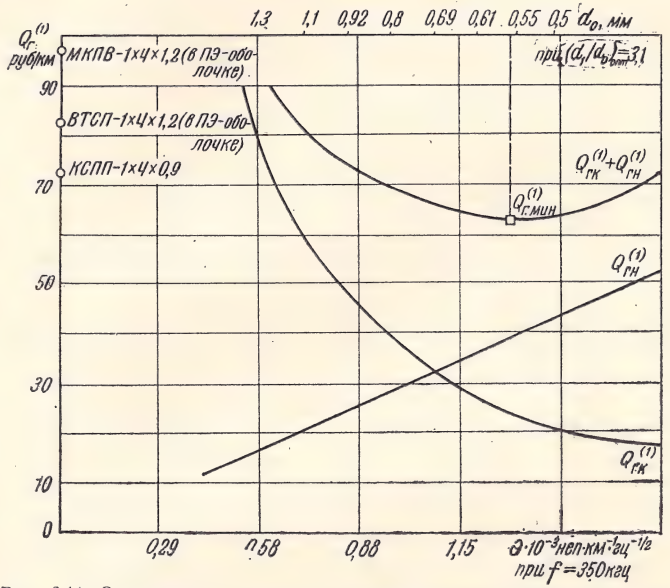

Рис. 3.14. Зависимость показателя сравнительных приведенных затрат на высокочастотную магистраль сельской связи с одночетверочным кабелем, уплотненным аппаратурой ИКМ-12, от величины коэффициента затухания при частоте 350 *кгц*:
□ — экономически оптимальная конструкция кабеля; ○ — существующие конструкции

не учтена, так как указанные системы рассчитаны для связи на короткие расстояния.

Величина $Q_г^{(1)}$ отнесена к 1 *км* линии и, в свою очередь, представлена в виде двух слагаемых: $Q_г^{(1)} = Q_{гк}^{(1)} + Q_{гн}^{(1)}$; $Q_{гк}^{(1)}$ пропорционально стоимости кабеля, $Q_{гн}^{(1)}$ — стоимости промежуточного усилительного оборудования (НУП).

При построении графиков приняты следующие (в достаточной степени произвольные) исходные данные:

— стоимость кабеля принята согласно рис. 3.6 при $(d_1/d_0)_{опт}$;
— стоимость промежуточного усилительного пункта на 12 ка-

На рис. 3.12 приведены зависимости $(d_1/d_0)_{опт}$ от θ для кабеля типа МКСБ-4×4 с ОУП на магистрали и без них. На рис. 3.11 и 3.12 отмечены значения для серийно выпускаемого кабеля МКСБ-4×4×1,2.

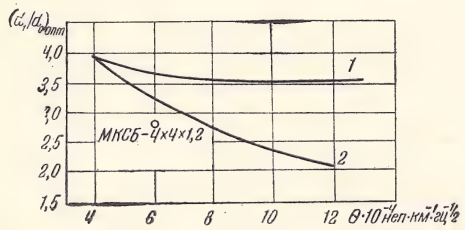

Рис. 3.12. Зависимость оптимальных конструктивных соотношений в четырехчетверочном кабеле дальней связи типа МКСБ-4×4 от величины коэффициента затухания без учета ОУП *(1)* и с учетом ОУП *(2)* на магистрали:
○ — существующая конструкция — кабель МКСБ-4×4×1,2

Как видно из графиков, наличие ОУП существенно изменяет форму кривых, сдвигая с ростом затухания величины $(d_1/d_0)_{опт}$ в сторону меньших значений (большей величины d_0).

Решение второго уравнения системы (3.11) приводит к определению условий получения минимума приведенных затрат на магистраль при изменении коэффициента затухания α и постоянной величине отношения d_1/d_0, которое, очевидно, необходимо выбирать оптимальным, так как оно должно удовлетворять первому уравнению системы (3.11).

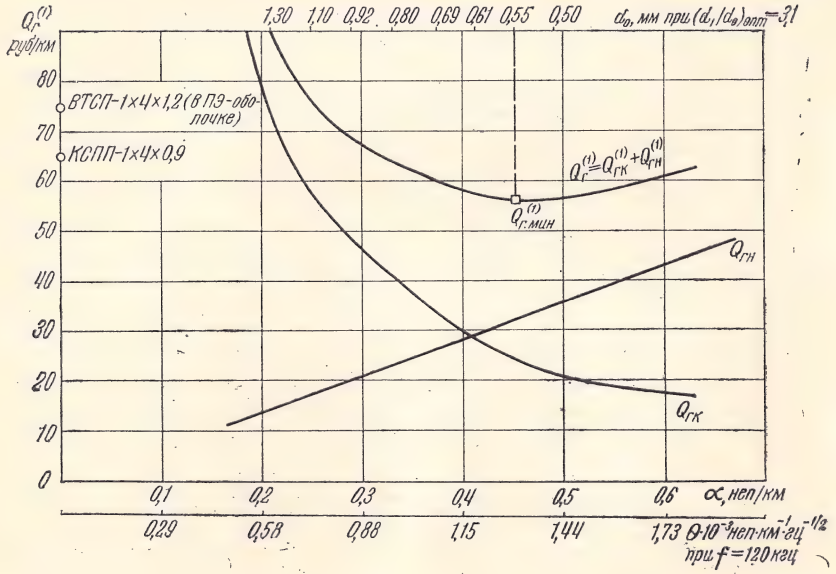

Рис. 3.13. Зависимость показателя сравнительных приведенных затрат на высокочастотную магистраль сельской связи с одночетверочным кабелем, уплотненным аппаратурой КНК-6, от величины коэффициента затухания при частоте 120 кгц:
□ — экономически оптимальная конструкция кабеля; ○ — существующие конструкции

Если в ф-ле (2.13) принять $D_i \approx D_c$ и $\chi \approx 1$, что допустимо при достаточно малой величине отношения толщины этих наружных покровов к диаметру сердечника, получаем

$$P_{ск} = \varkappa\pi d_0^2 \left\{ \frac{q}{4} \left[\gamma_ж p_ж + \gamma_и p_и \left(\left(\frac{d_1}{d_0} \right)^2 - 1 \right) \right] + \right.$$

$$\left. + F \zeta \left(\frac{d_1}{d_0} \right) \frac{1}{d_0} \sum \gamma_i p_i t_i \right\}. \qquad (2.14)$$

Расчет стоимости коаксиального кабеля

Так же, как и для симметричных кабелей, стоимость коаксиального кабеля может быть принята пропорциональной стоимости основных материалов [см. ф-лы (2.7) и (2.8)]. В результате, определяя геометрические размеры цепей по общепринятой методике [10], получаем выражение для стоимости комбинированного коаксиального кабеля

$$P_{кк} = \varkappa_{кк} M_{кк} + \varkappa_{ск} M = \varkappa_{кк}\pi d^2 \left\{ \frac{q_к}{4} \left[\gamma_{ж1} p_{ж1} + \gamma_и p_и \times \right. \right.$$

$$\times \left(\left(\frac{D}{d} \right)^2 - 1 \right) \left. \left. \right] + \frac{1}{d} \left(\frac{D}{d} \right) \left[q_к \left(\gamma_{ж2} p_{ж2} t + \gamma_э p_э t_э \right) + \right. \right.$$

$$\left. \left. + F \sum_i \gamma_i p_i t_i \right] + \varkappa_{ск} M_{ск}, \qquad (2.15)$$

где $\varkappa_{кк}$, $\varkappa_{ск}$ — коэффициенты пропорциональности цены коаксиального кабеля стоимости основных материалов соответственно коаксиальных и симметричных цепей; $M_{ск}$ — стоимость материалов симметричных цепей, входящих в коаксиальный кабель; d и D — диаметр внутреннего проводника и внутренний диаметр внешнего проводника коаксиальной пары (рис. 2.2); $\gamma_{ж1}$, $\gamma_{ж2}$, $\gamma_э$ и $p_{ж1}$, $p_{ж2}$, $p_э$ — соответственно удельный вес и удельная стоимость материала внутреннего и внешнего проводников и экрана коаксиальной пары; t и $t_э$ — толщина внешнего проводника и экрана коаксиальной пары; $q_к$ — количество коаксиальных пар в кабеле; F — коэффициент кабельной скрутки, зависящий от способа объединения коаксиальных пар в сердечник, рассчитывается как и для симметричного кабеля, причем величине $d_{гр}$ соответствует внешний диаметр коаксиальной пары.

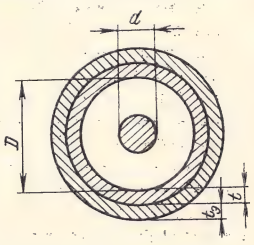

Рис. 2.2. Размеры коаксиальной пары

Выражение под знаком Σ в ф-ле (2.15) учитывает сумму стоимостей материалов внешних защитных покровов кабеля.

Из общих выражений (2.13), (2.14) и (2.15) можно получить более простые формулы для расчета различных конкретных конструкций симметричных и коаксиальных кабелей связи.

Как показывает сравнение результатов расчета стоимостей кабеля по ф-лам (2.13)—(2.15) с прейскурантными ценами, погрешность расчета весьма невелика.

2.3. Определение зависимости между стоимостными, конструктивными и электрическими характеристиками кабелей связи

Для решения задачи оптимизации магистралей и кабелей связи нужно определить зависимость стоимости кабеля от его электрических характеристик.

Очевидно, постановка вопроса о стоимости электрических характеристик, как таковых, в отрыве от реальной конструкции кабеля лишена смысла, так как имеют цену не характеристики, а обладающие ими конструкции. Поэтому определение зависимости стоимости кабеля от электрических характеристик может быть произведено лишь путем предварительного выражения их через конструктивные параметры, стоимостная оценка которых, как было показано, не представляет принципиальных трудностей.

В общем случае объектом комплексного технико-экономического анализа могут являться как параметры передачи, так и параметры влияния. Следует отметить, что наибольшие влияния между коаксиальными цепями происходят в области низких частот, а между симметричными цепями — в области высоких частот. В связи с трудностью выполнения норм по взаимным влияниям во всем диапазоне частот спектр уплотнения коаксиальных кабелей ограничивается снизу, а симметричных — сверху. В используемом для уплотнения диапазоне частот при заданной конструкции (различные варианты отличаются лишь конструктивными размерами), технологии изготовления, допусках, схеме организации связи технико-экономические показатели линий связи в первом приближении можно принять независимыми от величин параметров взаимного влияния кабеля либо учесть их с помощью некоторого коэффициента сложности.

Из параметров передачи наибольший интерес с технико-экономической точки зрения представляют величина коэффициента затухания (определяющая при прочих равных условиях частоту установки промежуточных усилителей), сопротивление цепи постоянному току (определяющее частоту установки ОУП) и волновое сопротивление.

Выражения (2.13)—(2.15) устанавливают связь между стоимостью кабеля и его конструктивными параметрами, но не учитывают в явном виде зависимость стоимости от величины коэффициента затухания и сопротивления цепи (в неявном виде эта зависимость присутствует, так как указанные характеристики однозначно определяются конструктивными параметрами кабеля). Поэтому в первую очередь возникает необходимость в выражении параметров передачи кабеля через конструктивные характеристики.

С целью упрощения выкладок целесообразно проводить расчет в зависимости от конструкции и области применения кабеля отдельно

других типов кабелей (например, кабелей ГТС), важно только, чтобы линии связи были достаточно короткими, без ОУП.

Для кабелей дальней связи и частично для зоновой связи необходимо принимать во внимание наличие ОУП. При исследовании первого уравнения системы (3.11) математически это выражается в том, что наряду с величиной $\vartheta_к P_к$ в слагаемом (3.8) приходится учитывать также величину $Q_{ОУП} r/R_{д0} d_0^2$, где d_0 выражается согласно ф-ле (2.50).

Из физических соображений ясно, что наличие ОУП должно сдвигать оптимальную величину d_1/d_0 в сторону меньших значений,

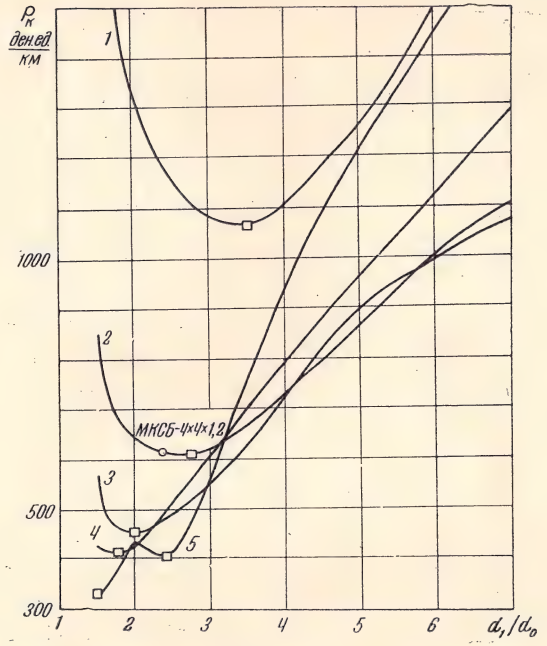

Рис. 3.11. Зависимость стоимости четырехчетверочного кабеля дальней связи, аналогично кабелю МКСБ с учетом стоимости ОУП от конструктивных соотношений при постоянной величине коэффициента затухания:

кривые *1—5* при $\theta = 4 \cdot 10^{-4}$; $6 \cdot 10^{-4}$; $8 \cdot 10^{-4}$; 10×10^{-4}; $12 \cdot 10^{-4}$ *неп·км*$^{-1}$·*гц*$^{-1/2}$ соответственно;
□ — конструкции минимальной стоимости; ○ — существующая конструкция — кабель МКСБ-4×4×1,2

когда (при прочих равных условиях) увеличивается величина d_0, а следовательно, уменьшается частота установки ОУП.

В качестве примера на рис. 3.11 приведено семейство кривых (при $\theta = \text{const}$) зависимости стоимости четырехчетверочного кабеля со стирофлексно-кордельной изоляцией, аналогичного по конструкции кабелю МКСБ-4×4×1,2, уплотненного аппаратурой К-60 (с учетом ОУП на магистрали).

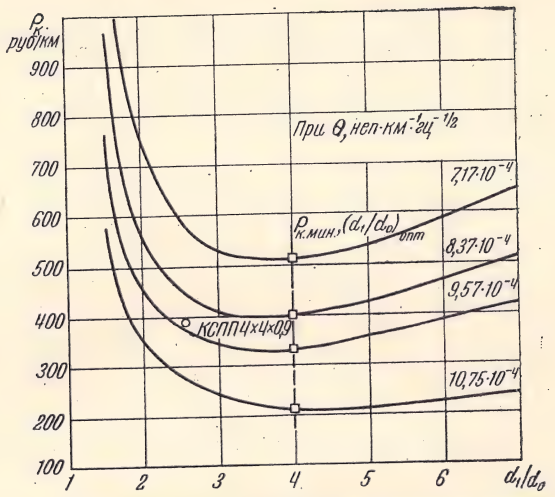

Рис. 3.9. Зависимость стоимости четырехчетверочного кабеля с медными жилами, полиэтиленовой изоляцией и полиэтиленовой оболочкой от соотношения диаметров изолированной и неизолированной жил при постоянных величинах коэффициента затухания (θ = = const):

□ — конструкции минимальной стоимости; ○ — существующая конструкция — кабель типа КСПП-4×4×0,9

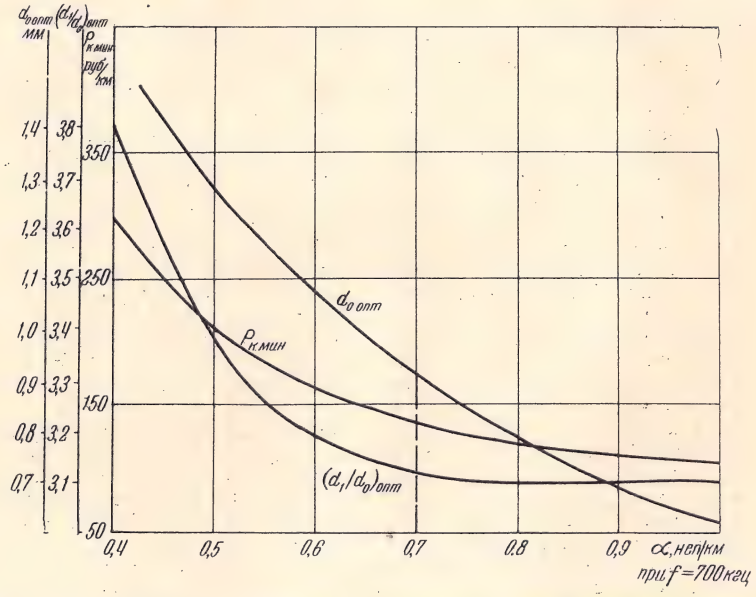

Рис. 3.10. Зависимость оптимальных характеристик одночетверочного кабеля местной связи от величин коэффициента затухания при частоте 700 *кгц*

для высокочастотных симметричных кабелей, для низкочастотных симметричных кабелей, для коаксиальных кабелей.

Рассмотрим эту задачу более детально для симметричных высокочастотных кабелей — наиболее сложный случай.

Вследствие зависимости величины коэффициента затухания от частоты в общем случае необходимо рассматривать весь спектр частот уплотнения. Однако задача облегчается тем, что, как правило, наибольший интерес представляет величина коэффициента затухания на высшей частоте спектра, так как именно этой величиной определяется расстояние между промежуточными усилителями, а затухание на нижних частотах корректируется соответствующими выравнивателями.

Для высоких частот коэффициент затухания цепи может быть представлен в виде суммы двух составляющих [10]:

$$\alpha = \alpha_R + \alpha_G, \tag{2.16}$$

учитывающих соответственно затухание в металле и в диэлектрике:

$$\alpha_R = \frac{R}{2}\sqrt{\frac{C_р}{L}}; \quad \alpha_G = \frac{G}{2}\sqrt{\frac{L}{C_р}}. \tag{2.17}$$

где R — полное активное сопротивление цепи, *ом/км*; $C_р$ — рабочая емкость цепи, *ф/км*; L — индуктивность цепи, *гн/км*; G — проводимость изоляции, *мо/км*; соответственно α, α_R и α_G — в *неп/км*[1]).

Область применения выражений (2.16), (2.17) определяется в зависимости от требуемой точности расчета. Как показано в [12], допускаемая при пользовании ф-л (2.17) погрешность не превышает 1% в случае, если $\omega L/R \geqslant 3{,}5$, и 3%, если $\omega L/R \geqslant 2{,}1$ (ω — круговая частота, $\omega = 2\pi f$, f — частота).

Полное активное сопротивление может быть представлено в виде суммы составляющих:

$$R = R_0 + R_{пэ} + R_{бл} + R_э + R_ж, \tag{2.18}$$

где R_0 — сопротивление цепи постоянному току; $R_{пэ}$ — сопротивление, обусловленное действием поверхностного эффекта; $R_{бл}$ — сопротивление, обусловленное эффектом близости; $R_э$, $R_ж$ — сопротивления потерь в экране (металлической оболочке) и в соседних жилах соответственно.

Сопротивление двухпроводной цепи постоянному току можно вычислить по формуле:

$$R_0 = \chi \frac{r}{d_0^2}, \tag{2.19}$$

где r — коэффициент; $r = 47$ для медных жил и $r = 78$ для алюминиевых жил.

Добавочное сопротивление, обусловленное поверхностным эффектом, зависит от частоты, размеров и материалов жил [11]:

$$R_{пэ} = R_0 F(x), \tag{2.20}$$

[1]) В этой книге расчет затуханий проведен в *неп*.

Функция $F(x)$ табулирована [11]. При аргументе $x \geqslant 10$ ее рекомендуется вычислять по формуле:

$$F(x) = \frac{\sqrt{2}x - 3}{4}. \qquad (2.21)$$

Аргумент x подсчитывается по следующим формулам: для медных проводников $x = 0{,}0105\, d_0 \sqrt{f}$, для алюминиевых $x = 0{,}0082\, d_0 \sqrt{f}$, где d_0 — в *мм*, f — в *гц*.

Расчеты показывают, что выражением (2.21) можно пользоваться и при значительно меньших величинах x. Например, при $x = 3$ (что для медного проводника $d_0 = 1{,}2$ *мм* соответствует частоте 90 *кгц*) разница между табличными (более точными) и вычисленными по ф-ле (2.21) значениями $F(x)$ не превышает 5%.

Добавочное сопротивление, обусловленное эффектом близости, зависит от частоты, размеров и материалов жил, толщины изоляции, типа скрутки, взаимного расположения жил, конструкции и расположения экрана. С учетом реакции экрана сопротивление, обусловленное эффектом близости, может быть вычислено по формуле

$$R_{бл} = R_0 \frac{pG(x)\left(\frac{d_0}{2a}\right)^2}{1 - H(x)\left(\frac{d_0}{2a}\right)^2}\,\delta, \qquad (2.22)$$

где a — половина расстояния между осями жил цепи:

$$2a = \xi d_1. \qquad (2.23)$$

Коэффициент $\xi = \zeta - 1$, $\xi = 1$ для парной скрутки и $\xi = 1{,}41$ для звездной; коэффициенты $p = 1$ для парной скрутки и $p = 5$ для звездной.

Функции $G(x)$ и $H(x)$ табулированы [11]. При $x \geqslant 10$ для их вычисления используются приближенные формулы:

$$G(x) \approx \frac{\sqrt{2}x - 1}{8}; \quad H(x) \approx 0{,}75. \qquad (2.24)$$

Реакция экрана учитывается сомножителем

$$\delta = 1 - 4\frac{(2a)^2 D_э^2}{D_э^4 - (2a)^4}, \qquad (2.25)$$

где $D_э$ — внутренний диаметр экрана.

При достаточно большой величине диаметра сердечника кабеля, его можно принять равным диаметру экрана (практически погрешность весьма мала уже для четырехчетверочных кабелей). В этом случае из выражения (2.25) с учетом ф-л (2.12) и (2.23) получаем

$$\delta = 1 - 4\frac{F^2 \zeta^2 \xi^2}{F^4 \zeta^4 - \xi^4}. \qquad (2.26)$$

метра и изоляцию большей толщины. В частности, для кабеля ВТСП та же величина коэффициента затухания может быть получена при $d_0 = 0{,}92$ *мм* и сплошной полиэтиленовой изоляции толщиной 0,97 *мм* (вместо 1,2 и 0,8 *мм* соответственно). При этом должны получить уменьшение стоимости кабеля примерно на 8% и уменьшится расход меди.

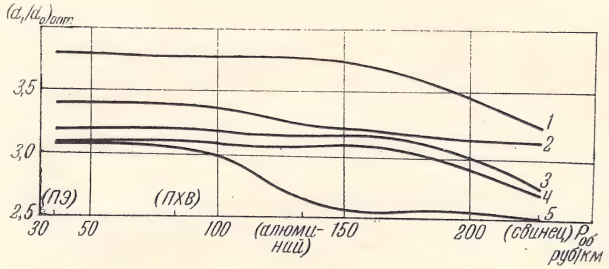

Рис. 3.8. Влияние стоимости оболочки на оптимальные конструктивные соотношения цепей одночетверочного кабеля с медными жилами:

кривые *1—5* при $\theta = 4{,}79 \cdot 10^{-4}$; $5{,}98 \cdot 10^{-4}$; $7 \cdot 17 \cdot 10^{-4}$; $8 \cdot 37 \cdot 10^{-4}$; $9{,}57 \cdot 10^{-4}$ *неп · км*$^{-1}$ *· гц*$^{1/2}$ соответственно

При увеличении стоимости оболочки $P_{об}$ стоимость кабеля также увеличится, а соотношение $(d_1/d_0)_{опт}$ сместится в сторону меньших значений, и наоборот. На рис. 3.8 приведена зависимость $(d_1/d_0)_{опт}$ от стоимости оболочки для рассмотренного выше одночетверочного кабеля. На оси $P_{об}$ выделены ориентировочные значения, соответствующие стоимостям оболочек из разных материалов: полиэтилена (ПЭ), поливинилхлорида (ПХВ), алюминия и свинца. Как видно из рисунка, влияние стоимости оболочки на величину $(d_1/d_0)_{опт}$ сказывается, лишь начиная с некоторой величины. Это объясняется тем, что при сравнительно малой стоимости оболочки ее «удельный вес» в общей сумме затрат на материалы незначителен.

Аналогично можно исследовать зависимость оптимальных конструктивных соотношений и стоимости кабеля от изменения стоимости и конструкции других его элементов.

На рис. 3.9 приведена зависимость от соотношения d_1/d_0 стоимости четырехчетверочного кабеля звездной скрутки с медными жилами, со сплошной полиэтиленовой изоляцией, с алюминиевым экраном толщиной 0,15 *мм*, полиэтиленовыми поясной изоляцией толщиной 1,0 *мм* и оболочкой толщиной 2,0 *мм*. Удельные стоимости исходных материалов приняты такими же, как и для аналогичного одночетверочного кабеля. Как видно из кривых, $(d_1/d_0)_{опт} \approx 4$, что несколько больше значений, полученных для одночетверочного кабеля (см. рис. 3.6).

Очевидно, чем больше заданная величина коэффициента затухания (при той же частоте), тем меньше будут оптимальные величины диаметра неизолированной жилы, отношения диаметров изолированной и неизолированной жил, стоимости кабеля. Соответствующие кривые для рассмотренного выше одночетверочного кабеля при частоте 700 *кгц* приведены на рис. 3.10.

Исследованные зависимости относятся к кабелям сельской связи. Соответствующие кривые и формулы могут быть получены и для

выми поясной изоляцией толщиной 0,8 *мм* и оболочкой толщиной 1,5 *мм*. Удельные стоимости меди, полиэтилена и алюминия приняты равными соответственно 0,95, 0,8 и 1,63 *руб./кг*. Кривые построены для различных значений коэффициента затухания, выраженного согласно ф-ле (2.41) с помощью параметра:

$$\theta = \frac{\alpha}{\sqrt{f}} . \qquad (3.12)$$

Целесообразность введения параметра θ вместо коэффициента затухания α обусловлена приблизительной пропорциональностью при достаточно высоких частотах затухания квадратному корню из частоты. В результате кривые получают большую универсальность.

Как видно из рис. 3.6, в области значений $d_1/d_0 \approx 3 \div 4$ кривые $P_к$ имеют минимумы (соединены пунктирной линией); соответствующие им соотношения d_1/d_0 и будут оптимальными для рассматриваемой конструкции кабеля. С увеличением затухания цепей $(d_1/d_0)_{опт}$ несколько уменьшается.

На рис. 3.7 приведены зависимости величин d_0 от d_1/d_0 для таких же одночетверочных кабелей. Как и следовало ожидать, с увеличением d_1/d_0 при $\alpha = \text{const}$ необходимо уменьшать d_0. Пунктиром

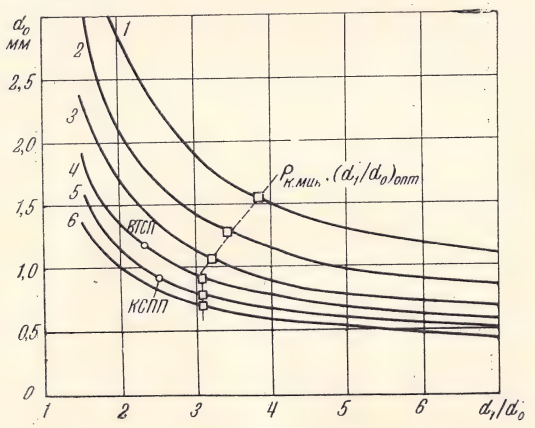

Рис. 3.7. Конструктивные соотношения в цепях одночетверочного кабеля с медными жилами, полиэтиленовой изоляции и алюминиевым экраном при постоянной величине коэффициента затухания:

кривые *1—6* при $\theta = 4{,}79 \cdot 10^{-4}$; $5{,}98 \cdot 10^{-4}$; $7{,}17 \times 10^{-4}$; $8{,}37 \cdot 10^{-4}$; $9{,}57 \cdot 10^{-4}$; $10{,}75 \cdot 10^{-4}$ *неп·км*$^{-1} \times$ *гц*$^{-1/2}$ соответственно;

□ — конструкции минимальной стоимости; ○ — существующие конструкции

соединены точки, соответствующие минимумам стоимости кабеля и $(d_1/d_0)_{опт}$.

На рис. 3.6 и 3.7 нанесены точки, соответствующие существующим одночетверочным кабелям аналогичной конструкции — ВТСП и КСПП. Как видно, конструктивные соотношения в реальных конструкциях близки к оптимальным. Однако имеется возможность уменьшить стоимость кабелей на 5—10%, применив жилу меньшего диа-

Как показывают расчеты по ф-ле (2.25) для одночетверочных кабелей величина δ близка к нулю (например, в кабеле ВТСП-1×4×1,2 сопротивление потерь на эффект близости в диапазоне частот до 550 *кгц* составляет не более 3% от полного активного сопротивления). В то же время для многопарных кабелей можно пренебречь реакцией экрана и принять $\delta = 1$ (уже для четырехчетверочных кабелей $\delta > 0{,}8$).

Из выражения (2.22) с учетом ф-л (2.19), (2.20), (2.23), (2.24) получаем для медной цепи:

$$R_{бл} \approx h \frac{0{,}087\sqrt{f}}{d_0 \left(\xi \frac{d_1}{d_2}\right)^2} , \qquad (2.27)$$

где $h = p\delta$.

Для одночетверочных кабелей можно принять $h \approx 0$, для многопарных кабелей $h \approx 5$ при звездной, $h \approx 1$ при парной, $h \approx 2$ при двойной парной скрутке.

Теоретический расчет потерь в экране и металлической оболочке кабеля, а также в соседних жилах [13] весьма затруднителен и неточен. Поэтому целесообразно воспользоваться имеющимися экспериментальными данными [11].

В табл. 2.2 приведены данные сопротивления потерь в экране $R'_э$ и в соседних жилах $R'_ж$ для кабеля в свинцовой и алюминиевой оболочке при частоте 200 *кгц*.

Потери на других частотах рассчитываются по формулам:

$$R_э = R'_э \sqrt{\frac{f}{200\,000}} ; \qquad (2.28) \qquad R_ж = R'_ж \sqrt{\frac{f}{200\,000}} . \qquad (2.29)$$

где f расчетная частота, *гц*.

ТАБЛИЦА 2.2

Дополнительные сопротивления симметричной цепи, обусловленные потерями в соседних жилах и в металлических оболочках кабелей при частоте 200 кгц

Число четверок в кабеле и их расположение по повивам	$R'_ж$, *ом/км*, для цепи, расположенной в повивах			$R'_э$, *ом/км*, для цепи, расположенной внутри свинцовой оболочки в повивах			$R'_э$, *ом/км*, для цепи, расположенной внутри алюминиевой оболочки в повивах		
	1-м	2-м	3-м	1-м	2-м	3-м	1-м	2-м	3-м
1	0	—	—	22	—	—	8,1	—	—
1+6	8,0	7,5	—	1,5	5,5	—	0,6	2,0	—
1+6+12	8,0	7,5	7,5	0	0	1,0	0	0	0,4

Для другого материала оболочки или жил пересчет $R'_э$ и $R'_ж$ производится путем умножения табличных значений на коэффициент $\sqrt{\frac{\rho}{\rho'}}$, где ρ — удельное сопротивление материала экрана или жил, соответствующего данным табл. 2.3; ρ' — то же, для материала, потери в котором следует определить.

При многослойном экране можно для проводимых в настоящей работе расчетов ограничиться рассмотрением лишь внутреннего слоя, так как на достаточно высоких частотах реакцией остальных слоев можно пренебречь.

Подставляя значения отдельных составляющих в формулу (2.18), определяем выражение для расчета полного активного сопротивления высокочастотной симметричной медной кабельной цепи в спектре частот от нескольких десятков килогерц до нескольких (около десяти) мегагерц:

$$R = \chi\left[\frac{0{,}174}{d_0} + \frac{12}{d_0^2\sqrt{f}} + h\frac{0{,}087}{d_0\left(\xi\frac{d_1}{d_0}\right)^2} + \right.$$

$$\left. + 2{,}23\cdot10^{-3}\left(R'_ж + R'_э\right)\right]\sqrt{f},\ ом/км, \qquad (2.30)$$

где размерности входящих величин: f — в *гц*, d_0 и d_1 — в *мм*, $R'_ж$ и $R'_э$ — в *ом/км*.

При достаточно высоких частотах вторым слагаемым в квадратных скобках в ф-ле (2.30) можно пренебречь.

Индуктивность кабельной цепи состоит из межпроводниковой индуктивности, обусловленной внешним магнитным полем, внутренней индуктивности, обусловленной полем внутри проводов, и дополнительной индуктивности, обусловленной магнитным полем в экране. При немагнитном экране на достаточно высоких частотах можно пренебречь составляющими индуктивности, обусловленными полями внутри проводников и внутри экрана. В этом случае полная индуктивность равна межпроводниковой индуктивности с учетом реакции экрана и может быть определена в виде

$$L = 4\cdot10^{-4}\ln\left|\frac{4a}{d_0}\psi\right|,\ гн/км, \qquad (2.31)$$

где ψ — коэффициент, учитывающий реакцию экрана.

Рабочая емкость симметричной кабельной цепи определяется конструкцией кабеля и материалом изоляции:

$$C_р = \frac{\varepsilon_э\cdot10^{-6}}{36\ln\left|\frac{4a}{d_0}\psi\right|},\ ф/км, \qquad (2.32)$$

где $\varepsilon_э$ — эквивалентная диэлектрическая проницаемость изоляции. Величина $\varepsilon_э$ для различных типов изоляции приведена в [10]. В частности, для сплошной полиэтиленовой изоляции она принимается равной 2,1, для пористой — 1,6, для стирофлексно-кордельной —

ность — толщиной изоляции. Поэтому заданная величина коэффициента затухания может быть получена различными способами путем соответствующего одновременного уменьшения диаметра неизолированных жил и увеличения толщины изоляции (при этом соответственно увеличиваются сопротивление и индуктивность и уменьшается емкость), и наоборот.

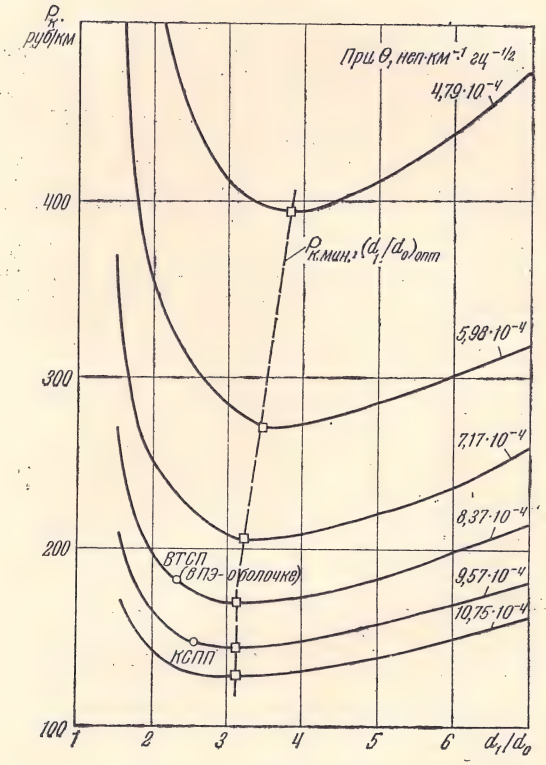

Рис. 3.6. Зависимость стоимости одночетверочного кабеля с медными жилами, алюминиевым экраном, полиэтиленовой изоляцией и полиэтиленовой оболочкой от соотношения диаметров изолированной и неизолированной жил при постоянных величинах коэффициента затухания (θ=const):
□ — конструкции минимальной стоимости; ○ — существующие конструкции

В то же время стоимость кабеля определяется суммой стоимостей жил и изоляции (а также других элементов кабеля) и будет различна при разных соотношениях диаметра жил и толщины изоляции. При определенных соотношениях она может быть минимальной.

На рис. 3.6 приведено семейство кривых зависимости стоимости от соотношения d_1/d_0 для одночетверочного кабеля звездной скрутки с медными жилами со сплошной полиэтиленовой изоляцией ($\varepsilon_э$=2,1), с алюминиевым экраном толщиной 0,15 *мм*, полиэтилено-

Для исследуемой задачи определения оптимальных параметров цепей симметричного кабеля при заданном типе аппаратуры уплотнения система (1.9) имеет вид:

$$\left.\begin{aligned}\frac{\partial Q_г}{\partial\left(\frac{d_1}{d_0}\right)}&=0\\ \frac{\partial Q_г}{\partial \alpha}&=0\end{aligned}\right\}, \tag{3.11}$$

где функция $Q_г$ определяется суммой (3.7).

Так как второе и третье слагаемые выражения (3.7) не зависят от параметров цепей кабеля, производные от них равны нулю, т. е. они не влияют на оптимальность параметров кабельных цепей. Действительно, пользуясь понятием сравнительных технико-экономических показателей, эти слагаемые можно принять одинаковыми для всех вариантов конструкций кабеля и исключить из рассмотрения при сравнении.

Важно отметить, что почти все обычно выбираемые при конструировании и проектировании оборудования магистралей связи параметры линейного тракта сосредоточены в первом слагаемом — $Q_г^{(1)}$, так что при соответствующих расчетах, как правило, достаточно ограничиваться только его анализом. Таким образом, оптимальные соотношения параметров цепей при заданном типе аппаратуры уплотнения определяются только стоимостью кабеля и промежуточного усилительного оборудования и не зависят от длины линии.

Поскольку при взятии частной производной по одной из переменных вторая переменная рассматривается в качестве константы, решение первого уравнения системы (3.11) соответствует определению оптимального конструктивного соотношения d_1/d_0 в цепях кабеля при постоянной величине коэффициента затухания.

Этот случай имеет самостоятельное практическое значение, так как часто при конструировании кабеля величина коэффициента затухания задается заранее или, как в случае связи на короткие расстояния без промежуточных усилителей, определяется необходимой дальностью связи. Кроме того, подобная задача встречается при сравнении различных конструкций кабеля с одинаковыми или близкими значениями коэффициента затухания.

Рассмотрим сначала более простой случай — магистраль связи без ОУП ($Q_{ОУП}=0$), характерный для линий СТС, ГТС и частично ЗС. В этом случае параметр d_1/d_0 входит только в стоимость кабеля и анализ первого уравнения системы (3.11) фактически сводится к анализу выражения (2.53). При этом задача принципиально ничем не отличается от исследования низкочастотного кабеля, рассмотренного в § 3.2.

Как показывает анализ выражения (2.53), зависимость стоимости кабеля $P_к$ от соотношения d_1/d_0 имеет явно выраженный минимум. Это обстоятельство имеет наглядное физическое объяснение. Как следует из ф-л (2.17), для α_R заданная величина коэффициента затухания может быть получена при различных величинах сопротивления, с одной стороны, и емкости и индуктивности, — с другой. При данной конструкции кабеля и частоте величина сопротивления определяется, главным образом, диаметром жил, а емкость и индуктив-

1,3. Для других типов комбинированной изоляции величина $\varepsilon_э$ может быть определена ориентировочно по формуле:

$$\varepsilon_э=\frac{\sum\limits_i \varepsilon_i S_i}{\sum\limits_i S_i}, \tag{2.33}$$

где ε_i и S_i — относительные диэлектрические проницаемости диэлектриков и площади, занимаемые ими в поперечном сечении кабеля.

Входящая в выражения для индуктивности и емкости величина ψ учитывает реакцию экрана и соседних жил и вычисляется, исходя из метода зеркальных отображений:

$$\psi=\frac{D_э^2-(2a)^2}{D_э^2+(2a)^2}. \tag{2.34}$$

Здесь $D_э$ — диаметр экрана (в случае одночетверочных и однопарных кабелей и экранированных четверок и пар) или диаметр воображаемой цилиндрической оболочки, образованной окружающими рассматриваемую четверку или пару проводниками соседних цепей (в многопарных кабелях).

Выражая $D_э$ через диаметр цепи и расстояние между изолированными проводниками цепи и экраном (реальным или воображаемым), из выражений (2.34), (2.12), (2.23) получаем

$$\psi=\frac{\left[\zeta+\frac{(D_э-d_{гр})}{d_1}\right]^2-\xi^2}{\left[\zeta+\frac{(D_э-d_{гр})}{d_1}\right]^2+\xi^2}. \tag{2.35}$$

В случае наложения экрана непосредственно на цепь, можно принять $D_э=d_{гр}$. Тогда из выражения (2.35) находим: для звездной скрутки $\psi\approx 0{,}5$, для парной скрутки $\psi\approx 0{,}6$. Для многопарных кабелей можно приближенно принять $D_э-d_{гр}=d_1$ и, следовательно, из выражения (2.35), найдем: для звездной скрутки $\psi\approx 0{,}69$; для парной — $\psi\approx 0{,}8$.

Для одночетверочных кабелей, имеющих, как правило, поясную изоляцию, следует учитывать ее толщину, и расчет производится по полной ф-ле (2.35).

В случае достаточно тонкой изоляции расчет емкости необходимо производить по более точным формулам. Например, в [16] рекомендуются выражения для случая однородного диэлектрика с учетом эксцентричного расположения цепи в экране:

для парной скрутки

$$C_р=\frac{\pi\varepsilon_э}{\ln\frac{4a}{d_0}-\frac{2a^2r_э^2}{\left(r_э^2-s^2\right)^2}-\left(\frac{d_0}{4a}\right)\left[1-\frac{4a^2r_э^2}{\left(r_э^2-s^2\right)^2}\right]^2}; \tag{2.36}$$

для звездной скрутки

$$C_p = \frac{\pi\varepsilon_э}{\ln\frac{4a}{a_0} - \frac{2a^2r_э^2}{(r_э^2-э^2)^2} - \left(\frac{d_0}{4a}\right)^2\left\{\left[1-\frac{4a^2r_э^2}{(r_э^2-э^2)^2}\right]^2 + \rightarrow\right.} \quad (2,37)$$

$$\left. \rightarrow + \left[2 - \frac{4a^2r_э^2}{(r_э^2-э^2)^2}\right]^2\right\},$$

где $r_э$ — радиус экрана; $э$ — эксцентриситет цепи в экране (расстояние между центром сечения цилиндрического экрана и средней точкой сечения цепи).

При достаточно высокой частоте (на основании ортогональности векторных линий электрического и магнитного полей в случае резко выраженного поверхностного эффекта) индуктивность кабельной цепи равна только внешней индуктивности и может быть вычислена посредством ф-л (2.36) и (2.37) из соотношения

$$L = \frac{9\cdot10^{10}\,\varepsilon_э}{C_p}, \; гн/км. \quad (2.38)$$

Ввиду сложности и неудобства использования выражений (2.36), (2.37) и (2.38) при проведении расчетов оптимальных конструкций кабелей связи рекомендуется использовать ф-лы (2.31) и (2.32) с уточнением величин ψ и ε_r по результатам экспериментальных данных для однотипных либо близких к рассматриваемой в каждом конкретном случае конструкций.

Проводимость изоляции

$$G = 2\pi f C_p \operatorname{tg}\delta_э, \quad (2.39)$$

где $tg\delta_э$ — тангенс угла диэлектрических потерь комбинированной изоляции:

$$\operatorname{tg}\delta_э = \frac{\sum_i S_i \operatorname{tg}\delta_i}{\sum_i S_i}, \quad (2.40)$$

где $\operatorname{tg}\delta_i$ — тангенс угла диэлектрических потерь диэлектриков, из которых состоит комбинированная изоляция.

У современных кабелей связи с высококачественной изоляцией величина G весьма мала. Ввиду этого затуханием в диэлектрике α_G можно пренебречь.

Например, для кабеля типа МКС-4×4×1,2 при частоте 250 *кгц* коэффициент затухания $\alpha=2{,}65$ *дб/км*, а рассчитанная по ф-ле (2.17) $\alpha_G=0{,}0065$ *дб/км*, т. е. около 0,3%.

Как показывают расчеты, для современных конструкций симметричных кабелей связи до частот порядка нескольких мегагерц (ориентировочно до 10 *Мгц*) можно ограничиться первым слагаемым в формуле, т. е. принимать $\alpha=\alpha_R$, (2.16). Для коаксиальных кабелей соответствующие предельные частоты значительно выше.

$$\left.\begin{array}{l} Q_г^{*}(d_1/d_0,\ \alpha) = 0 \\ \alpha_{вч},\ \alpha_{нч},\ Z_{вч},\ Z_{нч} = \text{const} \end{array}\right\}.$$

Так как для определения двух конструктивных параметров — d_1/d_0 и d_0 (через α) — система (3.6) содержит шесть уравнений, естественно, все предъявляемые требования удовлетворены быть не могут. Рассмотрим подробнее уравнения системы (3.6).

Наибольший интерес представляет величина приведенных затрат на магистраль, так как остальные величины, хоть и существенны для качества связи, однако действие их не является определяющим. Например, в принципе, можно представить себе даже разработку новой системы выравнивания и согласования для существующих систем уплотнения и, включив стоимость этой разработки в приведенные затраты (1.6) в качестве составной части стоимости аппаратуры, проводить все исследование в комплексе, пользуясь только первым уравнением системы (3.6). Произведя подстановку в выражения (1.6) количества НУП и ОУП, определяемых соответственно из ф-л (2.74), (2.75) или (2.77), и сгруппировав слагаемые, получаем:

$$Q_г = Q_г^{(1)} + Q_г^{(2)} + Q_г^{(3)}, \quad (3.7)$$

где

$$Q_г^{(1)} = \frac{1}{N}\left\{\left[\vartheta_к P_к + (\vartheta_н P_н + G_н\frac{\alpha}{a_у} + \frac{Q_{ОУП}}{R_{д0}}\left(\frac{r}{d_0^2} + r_0\frac{\alpha}{a_у}\right)\right]\right\}; \quad (3.8)$$

$$Q_г^{(2)} = \frac{1}{l_м}[\vartheta_а P_а + \vartheta_э P_э - \vartheta_н P_н - G_н - Q_{ОУП} + w_{общ}W_{ок} + \quad (3.9)$$

$$+ У_{ок} + G_{ок}];$$

$$Q_г^{(3)} = [Г + Y_л + \vartheta_к m_к + w_{общ}W_л], \quad (3.10)$$

где стоимость кабеля $P_к$ и диаметр неизолированной жилы d_0 должны определяться в соответствии с ф-лами (2.53) и (2.50).

Величина приведенных затрат в (3.7) представлена в виде суммы трех слагаемых:

— слагаемое $Q_г^{(1)}$ включает стоимость кабеля и промежуточных усилительных пунктов, является функцией параметров кабеля и не зависит от длины магистрали;

— слагаемое $Q_г^{(2)}$ включает стоимость оконечного оборудования, расходы на зарплату станционному обслуживающему персоналу, годовые расходы на содержание и ремонт оконечной аппаратуры и обратно пропорционально длине магистрали;

— слагаемое $Q_г^{(3)}$ включает транспортные расходы, расходы на прокладку, содержание и обслуживание линии и не зависит от ее длины, так как эти параметры выражаются в денежных единицах на единицу длины линии.

При увеличении длины линии уменьшается второе слагаемое, удельный вес которого в общей сумме затрат велик, и, следовательно, снижается величина приведенных затрат на магистраль в целом. Поэтому более длинные линии являются более экономичными.

цепей в кабеле, так как при известных типе аппаратуры уплотнения и потребности в связи эта величина определяется однозначно.

Принятие этих параметров в качестве заданных не означает их исключения из рассмотрения. Они остаются в анализируемых выражениях в математическом ранге констант. Из рассмотрения семейств кривых при различных фиксированных значениях констант можно исследовать влияние констант на основные зависимости. Примеры такого подхода будут даны в настоящем параграфе, при определении величины оптимального соотношения d_1/d_0 от стоимости оболочки и др.

В рассматриваемой задаче, как и для низкочастотных кабелей ГТС, определению подлежат величины d_0, d_1/d_0 и α, причем в качестве условно независимых переменных выступают d_1/d_0 и α, уравнение связи между которыми задается ф-лой (2.41) или (2.50). Так как расходы на высокочастотную магистраль определяются суммой затрат на кабель и аппаратуру, анализ технико-экономической оптимальности высокочастотного симметричного кабеля должен производиться методом частных производных на базе полного ур-ния (1.6) для приведенных затрат Q_r на магистраль, слагаемые которого должны быть развернуты относительно переменных d_1/d_0 и α. Такая зависимость имеется для стоимости кабеля, количества НУП и ОУП, в связи с чем соответствующие слагаемые в ур-нии (1.6) определяются из ф-л (2.53), (2.74), (2.76) или (2.77). При этом в двух последних формулах нет необходимости выражать затухание усилительного участка через количество каналов, так как при заданном типе аппаратуры эти величины известны. Кроме того, известными должны считаться частотный диапазон уплотнения, стоимости аппаратуры и коэффициенты, входящие в ур-ние (1.6). Очевидно, задаваемые величины должны отражать особенности линий различных типов (ДС, ЗС, СТС, ГТС) и условия конкретных задач в соответствии с § 3.1.

Хотя электрические характеристики α, R_0, $Z_в$ для симметричных высокочастотных кабелей не так жестко регламентируются, как для низкочастотных, где ими определялась дальность связи, однако и к ним может предъявляться ряд требований. С одной стороны, значение $\alpha_в$ (на высшей частоте передаваемого диапазона) определяет количество НУП, значение R_0 — количество ОУП. С другой стороны, аппаратура уплотнения и усиления рассчитана на коррекцию определенного вида искажений, вносимых линией в тракт передачи, и определенную величину входного сопротивления линий. Поэтому к форме частотной характеристики коэффициента затухания и волнового сопротивления кабеля предъявляются определенные требования, что должно учитываться дополнением системы (1.9) соответствующими уравнениями.

Удовлетворение этих требований представляет значительные трудности ввиду необходимости выполнения их в широком спектре частот, причем, как было показано, характеристики кабеля на различных участках этого спектра определяются различными формулами.

Поскольку для симметричных цепей с высокочастотным диэлектриком частотные характеристики параметров передачи α и Z в области верхних и нижних частот определяются по различным ф-лам (2.41)—(2.43) и (2.46)—(2.47), соответственно система уравнений (1.9) для определения оптимальных параметров цепей симметричных кабелей связи при заданном типе аппаратуры уплотнения может быть записана следующим образом:

В результате из ф-л (2.16), 2.17), (2.30)—(2.32) с учетом вышеизложенного получаем выражения для расчета коэффициента затухания симметричных высокочастотных кабельных цепей в диапазоне частот ориентировочно 0,1÷10 *Мгц*:

для цепей с медными жилами

$$\alpha = \frac{9{,}35\cdot 10^{-6}\,\chi\sqrt{\varepsilon_r f}}{\ln\left|2\xi\frac{d_1}{d_0}\psi\right|}\left\{\frac{78}{d_0}\left[1+\frac{h}{2\left(\xi\frac{d_1}{d_0}\right)^2}\right]+\right.$$

$$\left.+\left(R'_ж+R'_э\right)\right\}; \qquad (2.41)$$

для цепей с алюминиевыми жилами

$$\alpha = \frac{9{,}35\cdot 10^{-6}\,\chi\sqrt{\varepsilon_1 f}}{\ln\left|2\xi\frac{d_1}{d_0}\psi\right|}\left\{\frac{100}{d_0}\left[1+\frac{h}{2{,}25\left(\xi\frac{d_1}{d_0}\right)^2}\right]+\right.$$

$$\left.+\left(R'_ж+R'_э\right)\right\}; \qquad (2.42)$$

На нижних частотах указанного диапазона в (2.41) и (2.42) необходимо учитывать также второе слагаемое из (2.30)

$$Z_в=\sqrt{\frac{L}{C_р}}=\frac{120}{\sqrt{\varepsilon_э}}\ln\left(2\xi\frac{d_1}{d_0}\psi\right). \qquad (2.43)$$

Аналогичным образом могут быть получены аналитические выражения для параметров передачи симметричных кабельных цепей.

С целью оценки точности расчета по предлагаемым формулам на рис. 2.3 в качестве примера представлены результаты расчета по ф-ле (2.41) частотной характеристики коэффициента затухания кабеля типа МКС-4×4×1,2 и справочные данные. Как видно из графика, расхождение между кривыми невелико.

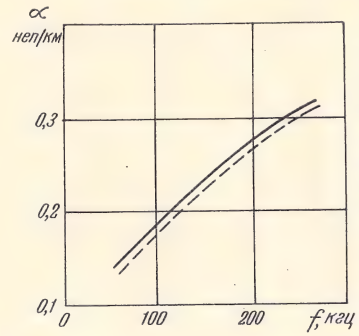

Рис. 2.3. Частотные характеристики коэффициента затухания кабеля типа МКС-4×4×1,2: (——расчетная, — — — фактическая)

Расчет параметров передачи низкочастотных кабелей значительно проще, чем высокочастотных. В этом случае следует учитывать их специфические особенности: ограниченный спектр частот, большое число цепей, сравнительно небольшие диаметры жил. В дальнейшем ограничимся рассмотрением только непупинизированных кабелей.

Как известно [10], затухание и волновое сопротивление симметричной цепи в области низких

частот могут быть определены из выражений:

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega R C_p}{2}}\ ; \qquad (2.44)$$

$$Z_в = \sqrt{\frac{R}{\omega C_p}}\ . \qquad (2.45)$$

Формулы (2.44) и (2.45) обладают погрешностью менее 1% при $R/\omega L \geqslant 50$ и менее 3% при $R/\omega L \geqslant 20$ [12].

Для низкочастотных кабелей расчетная частота принимается, как правило, равной 800 *гц*. Учитывая, что на низких частотах активное сопротивление можно принять равным сопротивлению постоянному току, из ф-л (2.44), (2.45), используя выражения (2.19), (2.31) и (2.32), получаем:

$$\alpha = \frac{0{,}295 \cdot 10^{-3}\,\chi}{d_0}\sqrt{\frac{r\,\varepsilon_э\,f}{\ln\left|2\xi\,\frac{d_1}{d_0}\,\psi\right|}}\ ; \qquad (2.46)$$

$$Z_в = \frac{2400}{d_0}\sqrt{\frac{r \ln\left|2\xi\,\frac{d_1}{d_0}\,\psi\right|}{\varepsilon_э\,f}}\ . \qquad (2.47)$$

При расчете электрических параметров коаксиальных цепей учитывается, что они используются, начиная с достаточно высоких частот.

Для расчета электрических параметров коаксиальных пар с медными проводниками в зависимости от конструктивных размеров можно воспользоваться выражениями [11]:

$$\alpha = \alpha_R = \frac{8{,}35\sqrt{f\,\varepsilon_r}\left(1 + \frac{1}{\frac{D}{d}}\right)10^{-3}}{12d \ln\frac{D}{d}}\ ; \qquad (2.48)$$

$$Z_в = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_r}} \ln\frac{D}{d}\ . \qquad (2.49)$$

В выражении (2.48) не учитывается, как малая, составляющая затухания, обусловленная потерями в диэлектрике — α_G (см. стр. 30): при частоте 10 *Мгц* величина α_G для нормальной коаксиальной пары (2,6/9,4) составляет около 0,5% от α, для малогабаритной коаксиальной пары (1,2/4,6) — 0,3% от α.

Определение взаимозависимости между стоимостью кабелей связи и коэффициентом затухания может быть произведено путем совместного решения систем ур-ний (2.14) и (2.41) или (2.42) — для высокочастотных симметричных кабелей, (2.14) и (2.46) — для низкочастотных симметричных кабелей, (2.15) и (2.48) — для коаксиальных кабелей.

Определение взаимозависимости между стоимостью, затуханием и волновым сопротивлением кабелей сводится к решению систем из

В качестве примера на рис. 3.5 построены кривые зависимости стоимости рассмотренного выше десятипарного кабеля от соотношения d_1/d_0 при $\alpha = \text{const}$ и $d_0 = \text{const}$. При $\alpha = \text{const}$ зависимость $P_к$ имеет вид вогнутой кривой с минимумом, при $d_0 = \text{const}$ зависимость $P_к$ почти прямолинейна. Очевидно, точки, лежащие ниже кривой *а* и справа от кривых *б* и *в*, соответствуют конструкциям кабеля с большей величиной α и R_0, и наоборот.

Поскольку для кабелей ГТС эти величины ограничиваются согласно ф-лам (3.4) для максимально допустимых значений $R_{0\,макс}$ и $\alpha_{макс}$, выбираемые конструкции должны лежать внутри заштрихованной на чертеже области. При этом если кривая $P_к$ при $d_0 = \text{const}$ пересекает кривую *а* левее минимума (на чертеже этому случаю соответствует линия *б*), то кабель наименьшей стоимости из этой допустимой области будет соответствовать точке пересечения этих кривых *а* и *б* (точка *1*). В этом случае приходится отступать от оптимума, соответствующего минимуму кривой *а*, а чтобы дальности $l_R = l_\nu$ величины d_0 и d_1/d_0 должны определяться из условия (3.5). Если же кривая $P_к$ при $d_0 = \text{const}$ пересекает кривую *а* справа от ее минимума (на чертеже этому случаю соответствует линия *в*, пересекающаяся с кривой $\alpha = \text{const}$ в точке *3*, — именно этот случай имеет место для существующего кабеля ТП-2×0,5), то кабель минимальной стоимости из допустимой области должен соответствовать минимуму кривой *а* (точка *2*). Физически этот результат объясняется тем, что хотя при движении по кривой *а* от точки *3* к точке *2* и создается ненужный запас по величине d_0 (R_0), в отношении стоимости кабеля выражающийся в увеличении расходов на медь, но при этом за счет уменьшения соотношения d_1/d_0 уменьшаются расходы на изоляционные материалы и оболочку.

Таким образом, при выборе параметров цепей низкочастотных кабелей ГТС приходится учитывать четыре условия, обусловленные заданными величинами α, R_0, $Z_в$ и требованием минимальной стоимости кабеля (с учетом телефонной канализации). В то же время практически имеются лишь два изменяемых конструктивных параметра: жилы и толщина изоляции. Поэтому при конструировании кабелей и проектировании линий связи учитываемые условия должны выбираться, исходя из конкретных требований производства и использования кабелей, после чего расчет может производиться в соответствии с изложенной выше методикой.

3.3. Выбор параметров цепей симметричных высокочастотных кабелей связи при заданном типе аппаратуры уплотнения

Наиболее сложную для расчета систему предоставляет линия дальней связи, к которой предъявляются исключительно высокие требования как по дальности связи и мощности пучков каналов, так и по качеству связи.

В поставленной задаче будем считать заданными такие параметры, как материал жил, изоляции и оболочки, тип кабеля, способы и стоимость его прокладки и монтажа и т. п. Обычно эти параметры обусловлены типом сети, назначением кабеля, применяемой аппаратурой, требуемой надежностью и пр. Примем заданным количество

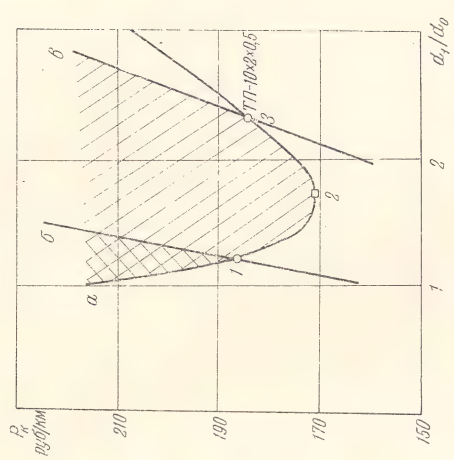

Рис. 3.5. Зависимость стоимости низкочастотного кабеля от соотношения диаметров изолированной и неизолированной жил:
а) при α=const (α =1,3 *об/км* при f=0,8 *кгц*; l =6,7 *км*); *б*) при d_0=const (d_0 =0,7 *мм*; α =10,5 *км*); *в*) при d_0=const (d_0 =0,5 *мм*; l_R =5,35 *км*; принято $a_{макс}$ =8,7 *об*, $R_{0макс}$=1000 *ом*

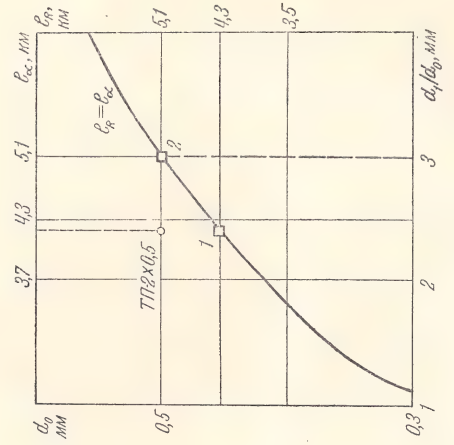

Рис. 3.4. Конструктивные соотношения в цепях низкочастотных кабелей типа ТП при условии равенства дальности связи по постоянному и переменному току:
○ — существующая конструкция кабеля ТП2×0,5; □ — возможные варианты конструкции кабеля парной скрутки типа ТП с жилами диаметром 0,5 *мм*

трех уравнений, полученных добавлением к указанным выше системам уравнений ф-л (2.43), (2.47), (2.49) соответственно.

Аналогичным образом может быть выражена взаимосвязь между стоимостью кабелей и другими параметрами.

Однако для анализа зависимости стоимости кабеля от электрических характеристик удобней оперировать не с системами уравнений, а с одним уравнением. Можно достичь объединения уравнений указанных систем в одно обобщенное уравнение. Причем с точки зрения упрощения математических выкладок целесообразно выразить через другие параметры диаметр неизолированной жилы симметричной цепи и внутреннего проводника коаксиальной пары, принимая в качестве второго конструктивного параметра цепей величины d_1/d_0 и D/d.

Таким образом, из выражений (2.41), (2.46), (2.48) получаем для медных высокочастотных симметричных цепей

$$d_0 = \frac{0{,}73\cdot 10^{-3}\sqrt{\varepsilon_э f}\left[1+\dfrac{h}{2\left(\xi\dfrac{d_1}{d_0}\right)^2}\right]}{\dfrac{\alpha}{\chi}\ln\left|2\xi\dfrac{d_1}{d_0}\psi\right| - 9{,}35\cdot 10^{-6}\left(R'_ж + R'_э\right)\sqrt{\varepsilon_э f}}; \tag{2.50}$$

для медных низкочастотных цепей

$$d_0 = \frac{2{\cdot}03\cdot 10^{-3}\,\chi}{\alpha}\sqrt{\frac{\varepsilon_э f}{\left[\ln\left|2\xi\dfrac{d_1}{d_0}\psi\right|\right.}}; \tag{2.51}$$

для медных коаксиальных цепей

$$d = \frac{8{,}35\sqrt{f\,\varepsilon_э}\left(1+\dfrac{1}{\dfrac{D}{d}}\right)\cdot 10^{-3}}{12\,\alpha\ln\dfrac{D}{d}}. \tag{2.52}$$

Подставляя ф-лы (2.50), (2.51), (2.52) соответственно в (2.14) и (2.15), получаем искомые выражения, связывающие стоимость кабеля с его конструктивными и электрическими характеристиками:

для высокочастотного симметричного кабеля

$$P_{ск} = \varkappa\pi\left\{\frac{0{,}73\cdot 10^{-3}\sqrt{\varepsilon_э f}\left[1+\dfrac{h}{2\left(\xi\dfrac{d_1}{d_0}\right)^2}\right]}{\dfrac{\alpha}{\chi}\ln\left|2\xi\dfrac{d_1}{d_0}\psi\right| - 9{,}35\cdot 10^{-6}\left(R'_ж + R_э\right)\sqrt{\varepsilon_э f}}\right\}^2 \times$$

$$\times\left\{\frac{q}{4}\left[\gamma_ж p_ж + \gamma_и p_и\left(\left(\frac{d_1}{d_0}\right)^2 - 1\right)\right] + F\zeta\frac{d_1}{d_0}\times\right.$$

$$\times \frac{\frac{\alpha}{\chi} \ln \left| 2\xi \frac{d_1}{d_0} \psi \right| - 9{,}35 \cdot 10^{-6} \left(R'_{ж} + R'_{э}\right) \sqrt{\varepsilon_э f}}{0{,}73 \cdot 10^{-3} \sqrt{\varepsilon_э f} \left[1 + \frac{h}{2\left(\xi \frac{d_1}{d_0}\right)^2}\right]} \times$$

$$\times \sum \gamma_i p_i l_i \Bigg\}; \qquad (2.53)$$

для низкочастотного симметричного кабеля

$$P_{ск} = \varkappa\pi \left[\frac{2 \cdot 03 \cdot 10^{-3} \chi}{\alpha} \sqrt{\frac{\varepsilon_э f}{\ln \left| 2\xi \frac{d_1}{d_0} \psi \right|}}\right]^2 \times$$

$$\times \left\{ \frac{q}{4} \left[\gamma_ж p_ж + \gamma_и p_и \left(\left(\frac{d_1}{d_0}\right)^2 - 1\right)\right] + \right.$$

$$\left. + F \zeta \frac{d_1}{d_0} \frac{\alpha}{2{,}03 \cdot 10^{-3} \chi} \sqrt{\frac{\ln \left| 2\xi \frac{d_1}{d_0} \psi \right|}{\varepsilon_э f}} \sum \gamma_i p_i l_i \right\}; \qquad (2.54)$$

для коаксиального кабеля

$$P_{кк} = \varkappa\pi \left[\frac{8{,}35 \sqrt{f \varepsilon_э} \left(1 + \frac{1}{\frac{D}{d}}\right) \cdot 10^{-3}}{12 \alpha \ln \frac{D}{d}}\right]^2 \times$$

$$\times \left\{ \frac{q}{4} \left[\gamma_{ж1} p_{ж1} + \gamma_и p_и \left(\left(\frac{D}{d}\right)^2 - 1\right)\right] + \right.$$

$$+ \frac{12\alpha \frac{D}{d} \ln \frac{D}{d}}{8{,}35 \sqrt{f \varepsilon_э} \left(1 + \frac{1}{\frac{D}{d}}\right) \cdot 10^{-3}} \left[q \left(\gamma_{ж2} p_{ж2} t + \gamma_э p_э t_э\right) + \right.$$

$$\left. \left. + F \sum \gamma_i p_i l_i \right] \right\}. \qquad (2.55)$$

возможности для изменения характеристик представляют лишь два параметра: d_0 и d_1/d_0. Таким образом, приходится ограничиваться выполнением только двух условий, в качестве которых, естественно, выбрать условия минимума затрат и заданной частотной характеристики α. В результате определяются d_0 и d_1/d_0.

Проблема усложняется еще больше, если иметь в виду, что величина d_0 связана с сопротивлением цепи постоянному току, которое для кабелей ГТС жестко лимитируется. Поэтому найденный из указанных выше трех условий диаметр неизолированной жилы должен быть не меньше, чем определенный по ф-ле (2.19) с учетом нормы по R_0.

Более того, так как максимальная длина линии определяется возможностью передачи разговорных (переменных) токов и токов управления соединением и питания микрофонов, с технико-экономической точки зрения целесообразно выполнение этих норм при одной и той же длине линии (в противном случае остается неиспользуемый запас по одной из характеристик).

Максимально допустимые длины линий могут быть определены из ф-л (2.19) и (2.46):

$$l_R = \frac{R_{0\,макс}}{R_0}; \; l_\alpha = \frac{a_{макс}}{\alpha}, \qquad (3.4)$$

где $a_{макс}$ и $R_{0\,макс}$ — максимально допустимые величины затухания и сопротивления цепи ГТС постоянному току. Из условия $l_R = l_\alpha$ получаем условие равенства дальности связи по постоянному и переменному току

$$d_0 = \frac{a_{макс}}{0{,}295 \cdot 10^{-3} R_{0\,макс}} \sqrt{\frac{r \ln \left(2\xi \frac{d_1}{d_0} \varphi\right)}{\varepsilon_э f}}. \qquad (3.5)$$

На рис. 3.4 представлена зависимость между величинами d_0 и d_1/d_0, полученная из условия (3.5) для кабеля парной скрутки с медными жилами и полиэтиленовой изоляцией, аналогичного рассмотренным выше (в расчете принято: $a_{макс} = 5{,}6$ *дб* (0,65 *неп*) $f = 800$ *гц*, $R_{0\,макс} = 1000$ *ом*, $2\xi\psi = 1{,}6$, $r = 47$, $\varepsilon_э = 2{,}1$). На горизонтальной оси приведен также масштаб кабеля. Отдельно отмечен кабель типа ТП парной скрутки с диаметром жилы 0,5 *мм*.

Как видно из графика, в кабеле типа ТП имеется неиспользуемый запас d_0 по величине $R_{0\,макс}$, так как $l_\alpha \approx 4$ *км*, а $l_R \approx 5{,}1$ *км*. Поскольку общая дальность связи определяется меньшей из этих величин, казалось бы, имеется реальная возможность снизить расход меди, не уменьшая максимальной длины линии, путем применения жилы диаметром 0,45 *мм* вместо 0,5 *мм* (точка *1* на графике), либо при том же расходе меди увеличить дальность связи, «подтянув» l_α до 5,1 *км* за счет соответствующего увеличения d_1/d_0 (точка *2* на графике). Однако здесь следует иметь в виду, что наличие неиспользуемого запаса по одной из характеристик (R_0 или α) не обязательно приводит к удорожанию кабеля, а в отдельных случаях может весьма существенно снизить его стоимость. Это происходит тогда, когда изменение какой-либо характеристики в сторону увеличения запаса приближает конструктивные соотношения в цепях к экономически оптимальным.

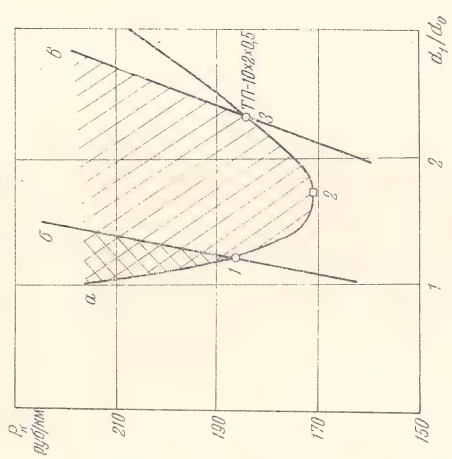

Рис. 3.5. Зависимость стоимости низкочастотного кабеля от соотношения диаметров изолированной и неизолированной жил:
а) при α=const (α =1,3 *дб/км* при f=0,8 *кгц*; l =6,7 *км*); *б*) при d_0=const (d_0 =0,7 *мм*; α =10,5 *км*); *в*) при d_0=const (d_0 =0,5 *мм*; l_R =5,35 *км*; принято $a_{макс}$ =8,7 *дб*, $R_{0макс}$= =1000 *ом*

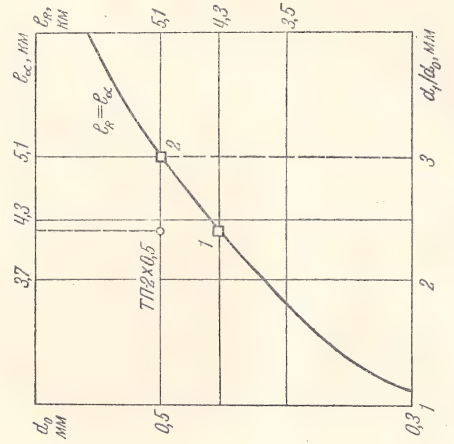

Рис. 3.4. Конструктивные соотношения в цепях низкочастотных кабелей типа ТП при условии равенства дальности связи по постоянному и переменному току:
○ — существующая конструкция кабеля ТП2×0,5; □ — возможные варианты конструкции кабеля парной скрутки типа ТП с жилами диаметром 0,5 *мм*

трех уравнений, полученных добавлением к указанным выше системам уравнений ф-л (2.43), (2.47), (2.49) соответственно.

Аналогичным образом может быть выражена взаимосвязь между стоимостью кабелей и другими параметрами.

Однако для анализа зависимости стоимости кабеля от электрических характеристик удобней оперировать не с системами уравнений, а с одним уравнением. Можно достичь объединения уравнений указанных систем в одно обобщенное уравнение. Причем с точки зрения упрощения математических выкладок целесообразно выразить через другие параметры диаметр неизолированной жилы симметричной цепи и внутреннего проводника коаксиальной пары, принимая в качестве второго конструктивного параметра цепей величины d_1/d_0 и D/d.

Таким образом, из выражений (2.41), (2.46), (2.48) получаем для медных высокочастотных симметричных цепей

$$d_0 = \frac{0{,}73\cdot 10^{-3}\sqrt{\varepsilon_э f}\left[1+\dfrac{h}{2\left(\xi\dfrac{d_1}{d_0}\right)^2}\right]}{\dfrac{\alpha}{\chi}\ln\left|2\xi\dfrac{d_1}{d_0}\psi\right| - 9{,}35\cdot 10^{-6}\left(R'_ж + R'_э\right)\sqrt{\varepsilon_э f}}; \tag{2.50}$$

для медных низкочастотных цепей

$$d_0 = \frac{2{\cdot}03\cdot 10^{-3}\chi}{\alpha}\sqrt{\frac{\varepsilon_э f}{\left[\ln\left|2\xi\dfrac{d_1}{d_0}\psi\right|\right.}}; \tag{2.51}$$

для медных коаксиальных цепей

$$d = \frac{8{,}35\sqrt{f\,\varepsilon_э}\left(1+\dfrac{1}{\dfrac{D}{d}}\right)\cdot 10^{-3}}{12\,\alpha\ln\dfrac{D}{d}}. \tag{2.52}$$

Подставляя ф-лы (2.50), (2.51), (2.52) соответственно в (2.14) и (2.15), получаем искомые выражения, связывающие стоимость кабеля с его конструктивными и электрическими характеристиками:

для высокочастотного симметричного кабеля

$$P_{ск} = \varkappa\pi\left\{\frac{0{,}73\cdot 10^{-3}\sqrt{\varepsilon_э f}\left[1+\dfrac{h}{2\left(\xi\dfrac{d_1}{d_0}\right)^2}\right]}{\dfrac{\alpha}{\chi}\ln\left|2\xi\dfrac{d_1}{d_0}\psi\right| - 9{,}35\cdot 10^{-6}\left(R'_ж + R_э\right)\sqrt{\varepsilon_э f}}\right\}^2 \times$$

$$\times\left\{\frac{q}{4}\left[\gamma_ж\rho_ж + \gamma_и\rho_и\left(\left(\frac{d_1}{d_0}\right)^2 - 1\right)\right] + F\zeta\frac{d_1}{d_0}\times\right.$$

$$\times \frac{\frac{\alpha}{\chi} \ln \left| 2\xi \frac{d_1}{d_0} \psi \right| - 9{,}35 \cdot 10^{-6} \left(R'_{ж} + R'_{э}\right) \sqrt{\varepsilon_э f}}{0{,}73 \cdot 10^{-3} \sqrt{\varepsilon_э f} \left[1 + \frac{h}{2\left(\xi \frac{d_1}{d_0}\right)^2}\right]} \times$$

$$\times \sum \gamma_i p_i t_i \Bigg\} ; \qquad (2.53)$$

для низкочастотного симметричного кабеля

$$P_{ск} = \varkappa\pi \left[\frac{2{\cdot}03 \cdot 10^{-3} \chi}{\alpha} \sqrt{\frac{\varepsilon_э f}{\ln \left| 2\xi \frac{d_1}{d_0} \psi \right|}} \right]^2 \times$$

$$\times \left\{ \frac{q}{4} \left[\gamma_ж p_ж + \gamma_и p_и \left(\left(\frac{d_1}{d_0}\right)^2 - 1 \right) \right] + \right.$$

$$\left. + F \zeta \frac{d_1}{d_0} \frac{\alpha}{2{,}03 \cdot 10^{-3} \chi} \sqrt{\frac{\ln \left| 2\xi \frac{d_1}{d_0} \psi \right|}{\varepsilon_э f}} \sum \gamma_i p_i t_i \right\} ; \qquad (2.54)$$

для коаксиального кабеля

$$P_{кк} = \varkappa\pi \left[\frac{8{,}35 \sqrt{f \varepsilon_э} \left(1 + \frac{1}{\frac{D}{d}}\right) \cdot 10^{-3}}{12 \alpha \ln \frac{D}{d}} \right]^2 \times$$

$$\times \left\{ \frac{q}{4} \left[\gamma_{ж1} p_{ж1} + \gamma_и p_и \left(\left(\frac{D}{d}\right)^2 - 1 \right) \right] + \right.$$

$$+ \frac{12\alpha \frac{D}{d} \ln \frac{D}{d}}{8{,}35 \sqrt{f \varepsilon_э} \left(1 + \frac{1}{\frac{D}{d}}\right) \cdot 10^{-3}} \left[q \left(\gamma_{ж2} p_{ж2} t + \gamma_э p_э t_э \right) + \right.$$

$$\left. \left. + F \sum \gamma_i p_i t_i \right] \right\} . \qquad (2.55)$$

возможности для изменения характеристик представляют лишь два параметра: d_0 и d_1/d_0. Таким образом, приходится ограничиваться выполнением только двух условий, в качестве которых, естественно, выбрать условия минимума затрат и заданной частотной характеристики α. В результате определяются d_0 и d_1/d_0.

Проблема усложняется еще больше, если иметь в виду, что величина d_0 связана с сопротивлением цепи постоянному току, которое для кабелей ГТС жестко лимитируется. Поэтому найденный из указанных выше трех условий диаметр неизолированной жилы должен быть не меньше, чем определенный по ф-ле (2.19) с учетом нормы по R_0.

Более того, так как максимальная длина линии определяется возможностью передачи разговорных (переменных) токов и токов управления соединением и питания микрофонов, с технико-экономической точки зрения целесообразно выполнение этих норм при одной и той же длине линии (в противном случае остается неиспользуемый запас по одной из характеристик).

Максимально допустимые длины линий могут быть определены из ф-л (2.19) и (2.46):

$$l_R = \frac{R_{0\,макс}}{R_0} ; \; l_\alpha = \frac{a_{макс}}{\alpha} . \qquad (3.4)$$

где $a_{макс}$ и $R_{0\,макс}$ — максимально допустимые величины затухания и сопротивления цепи ГТС постоянному току. Из условия $l_R = l_\alpha$ получаем условие равенства дальности связи по постоянному и переменному току

$$d_0 = \frac{a_{макс}}{0{,}295 \cdot 10^{-3} R_{0\,макс}} \sqrt{\frac{r \ln \left(2\xi \frac{d_1}{d_0} \varphi \right)}{\varepsilon_э f}} . \qquad (3.5)$$

На рис. 3.4 представлена зависимость между величинами d_0 и d_1/d_0, полученная из условия (3.5) для кабеля парной скрутки с медными жилами и полиэтиленовой изоляцией, аналогичного рассмотренным выше (в расчете принято: $a_{макс} = 5{,}6$ *дб* (0,65 *неп*) $f = 800$ *гц*, $R_{0\,макс} = 1000$ *ом*, $2\xi\psi = 1{,}6$, $r = 47$, $\varepsilon_э = 2{,}1$). На горизонтальной оси приведен также масштаб кабеля. Отдельно отмечен кабель типа ТП парной скрутки с диаметром жилы 0,5 *мм*.

Как видно из графика, в кабеле типа ТП имеется неиспользуемый запас d_0 по величине $R_{0\,макс}$, так как $l_\alpha \approx 4$ *км*, а $l_R \approx 5{,}1$ *км*. Поскольку общая дальность связи определяется меньшей из этих величин, казалось бы, имеется реальная возможность снизить расход меди, не уменьшая максимальной длины линии, путем применения жилы диаметром 0,45 *мм* вместо 0,5 *мм* (точка *1* на графике), либо при том же расходе меди увеличить дальность связи, «подтянув» l_α до 5,1 *км* за счет соответствующего увеличения d_1/d_0 (точка *2* на графике). Однако здесь следует иметь в виду, что наличие неиспользуемого запаса по одной из характеристик (R_0 или α) не обязательно приводит к удорожанию кабеля, а в отдельных случаях может весьма существенно снизить его стоимость. Это происходит тогда, когда изменение какой-либо характеристики в сторону увеличения запаса приближает конструктивные соотношения в цепях к экономически оптимальным.

мичнее парной. Так, стоимость оптимальной конструкции двадцатипятичетверочного кабеля на 15% ниже стоимости пятидесятипарного кабеля (при той же величине затухания). Важно подчеркнуть, что сравниваться должны именно оптимальные варианты. Действительно, выбрав, например, величину d_1/d_0, равную 3 для звездной скрутки и 2 — для парной, можно сделать ошибочный вывод о большей эффективности парной скрутки.

Следует отметить, что при выборе типа скрутки необходимо также принимать во внимание требования к помехозащищенности цепей. В частности, как известно, парная скрутка обеспечивает несколько большую защищенность от взаимных влияний, чем звездная.

Кабели ГТС, как правило, прокладываются и эксплуатируются в телефонной канализации. Чем меньше наружный диаметр кабеля, тем более эффективно используются канализационные сооружения.

Принимая диаметр кабеля равным диаметру сердечника (2.12), можно определить стоимость канализационных сооружений на километр кабеля:

$$P_{\text{с}} = \frac{F \zeta d_1}{\Omega D_{\text{кан}}} \lambda_{\text{кан}}, \qquad (3.2)$$

где $\lambda_{\text{кан}}$ — стоимость километра канала диаметра $D_{\text{кан}}$; Ω — коэффициент заполнения канала (отношение суммы диаметров кабелей, проложенных в одном канале, к диаметру канала, принимаемое равным 0,75).

При определении оптимальных соотношений в кабелях ГТС необходимо рассматривать сумму стоимостей кабеля и канализации, определяемых по ф-лам (2.14) или (2.54) и (3.2):

$$P_{\text{к}} + P_{\text{с}} = \varkappa\pi \left[\frac{2{,}03 \cdot 10^{-3} \chi}{\alpha} \sqrt{\frac{\varepsilon_{\text{э}} f}{\ln \left| 2\xi \frac{d_1}{d_0} \varphi \right|}} \right]^2 \times$$

$$\times \left\{ \frac{q}{4} \left[\gamma_{\text{ж}} p_{\text{ж}} + \gamma_{\text{и}} p_{\text{и}} \left(\left(\frac{d_1}{d_0} \right)^2 - 1 \right) \right] + \frac{\alpha}{2{,}03 \cdot 10^{-3} \chi} \times \right.$$

$$\left. \times F \zeta \left(\frac{d_1}{d_0} \right) \sqrt{\frac{\ln \left| 2\xi \frac{d_1}{d_0} \psi \right|}{\varepsilon_{\text{э}} f}} \left(\sum \gamma_i p_i l_i + \frac{\lambda_{\text{кан}}}{\varkappa\pi\Omega D_{\text{кан}}} \right) \right\}. \qquad (3.3)$$

Зависимости $P_{\text{к}} + P_{\text{с}}$ для кабеля парной скрутки от соотношения d_1/d_0 представлены на рис. 3.2 и 3.3 штриховыми линиями. Как видно из графиков, учет стоимости канализации приводит к смещению оптимальных величин d_1/d_0 в сторону меньших значений, хотя практически эти изменения невелики. Если отнести расходы на канализацию к стоимости оболочки, то можно сделать вывод, что даже значительное увеличение стоимости оболочки не приводит к существенному изменению оптимальных соотношений.

Как показывают расчеты, в общем случае при фиксированном d_0 соотношения d_1/d_0, обеспечивающие получение заданных частотных характеристик α и $Z_{\text{в}}$ и удовлетворяющие условиям минимума затрат, не совпадают.

Действительно для удовлетворения этих трех условий в соответствии с вышеуказанным приходится совместно решать три ур-ния (2.46), (2.47), (3.3) — по числу условий. В то же время реальные

2.4. Определение зависимости между стоимостными и эксплуатационно-техническими характеристиками аппаратуры уплотнения и усиления для кабельных линий связи

Укрупненный расчет стоимости аппаратуры связи представляет значительные трудности, ввиду разнообразия типов и схем входящих в нее элементов и функциональных узлов, обусловленного назначением, областью применения, техническими характеристиками и методами эксплуатации оборудования. Трудности особенно возрастают при сравнении аппаратуры, основанной на различных технических принципах. Однако при сравнительной оценке аппаратуры, работающей на одних и тех же технических принципах, можно исследовать все рассматриваемые варианты при одинаковых условиях, что вытекает из требования их сопоставимости. Это обстоятельство является основанием для применения методов укрупненных расчетов, так как при указанных условиях для различных систем уплотнения (проектируемых и существующих) требуются сравнимые статьи затрат.

Система высокочастотной связи состоит из оконечных станций с оборудованием частотного преобразования и кабельной линии с обслуживаемым и необслуживаемым усилительным оборудованием.

Оборудование оконечных станций включает аппаратуру многоканальных систем передачи, а также вводную, испытательную, измерительную аппаратуру, оборудование контроля и коммутации каналов и групп, служебной связи, дистанционного питания, телеуправления, вспомогательную аппаратуру. Стоимость многоканальных систем передачи, как правило, значительно превышает затраты на остальное станционное оборудование, причем последние практически не зависят от основных характеристик аппаратуры и кабеля и в большинстве случаев могут быть исключены из рассмотрения при технико-экономическом сравнении различных вариантов организации кабельных линий связи.

По назначению и выполняемым функциям оборудование собственно систем передачи можно подразделить на индивидуальное, групповое и генераторное оборудование. При этом для многоканальных систем с числом каналов более 24 это оборудование разрабатывается с учетом унификации элементов.

В общем случае определение стоимости аппаратуры может производиться согласно выражению (2.2) указанными выше укрупненными методами (см. § 2.1), причем в качестве основной статьи расчета обычно рекомендуется применять статью затрат на покупные изделия и полуфабрикаты, удельный вес которых в общей стоимости аппаратуры весьма велик.

В качестве примера в табл. 2.3 приведена структура себестоимости аппаратуры вч уплотнения.

С точки зрения технико-экономической эффективности системы связи в целом при рассмотрении аппаратуры уплотнения кабельных линий связи наиболее важными представляются следующие ее параметры: мощность системы (количество организуемых одной системой уплотнения каналов), ширина и расположение линейного спектра частот.

Поэтому при рассмотрении вопросов технико-экономической оптимизации кабельных магистралей необходимо в первую очередь опре-

ТАБЛИЦА 2.3

Распределение себестоимости аппаратуры вч уплотнения по статьям затрат, %

Статьи затрат	Величина
Основные материалы	10
Покупные изделия и полуфабрикаты	35
Основная заработная плата	17
Накладные расходы	34
Внепроизводственные расходы	4
Итого	100

делить зависимость стоимости аппаратуры от указанных характеристик.

Для обеспечения передачи по междугородной связи всех видов информации отечественными стандартами (в соответствии с рекомендациями МККТТ) предусматривается возможность организации телефонных каналов тональной частоты в диапазоне 0,3÷3,4 *кгц* и многоканальных групп: первичных широкополосных групп (ПГ) в диапазоне 60÷108 *кгц*, вторичных широкополосных групп (ВГ) в диапазоне 312÷552 *кгц*, третичных широкополосных групп (ТГ) в диапазоне 812÷2044 *кгц*, четверичных групп (ЧГ) в диапазоне 8516÷12388 *кгц*. Для образования этих спектров применяется стандартное оборудование.

В связи с унификацией элементов оконечного оборудования и используемых спектров частот количество каналов в различных системах и, следовательно, занимаемый ими спектр частот изменяются ступенчато.

При современном уровне техники оптимальной считается схема построения высокочастотных систем, при которой в каждой вышестоящей группе содержится 3—6 нижестоящих, а количество каналов в группах кратно 12. На этом принципе построены существующие отечественные системы уплотнения кабельных линий связи.

В табл. 2.4 показаны схемы организации высокочастотной многоканальной связи, частотный спектр и способ его построения для наиболее важных отечественных систем уплотнения кабельных линий дальней связи.

На рис. 2.4 показаны зависимости удельной стоимости оконечной аппаратуры уплотнения p_a и доли индивидуального оборудования (включая ступень первичного преобразования) в стоимости системы $\delta_и$ от мощности системы N_c (стоимость оборудования дистанционного питания, оборудования служебной связи, измерительного и вводно-коммутационного оборудования не учитывалась). Комплектация и стоимость оборудования приняты по справочным данным [17] и материалам Гипросвязи. Как видно, затраты на оконечные станции определяются, главным образом, стоимостью оборудования индивидуального преобразования, пропорциональной числу каналов в системе. При достаточно большом N_c стоимость оконечного оборудования в пересчете на один канал может быть принята постоянной для различных систем. Этот вывод совпадает с результатами,

В то же время по трудоемкости этот способ незначительно уступает первому, так как взятие производных функций (2.54) приводит к громоздким, неудобным для анализа и расчета выражениям.

На рис. 3.2 и 3.3 показаны расчетные зависимости стоимости кабеля типа ТПВ (в полихлорвиниловой оболочке) при $\alpha=1{,}3$ *дб/км*

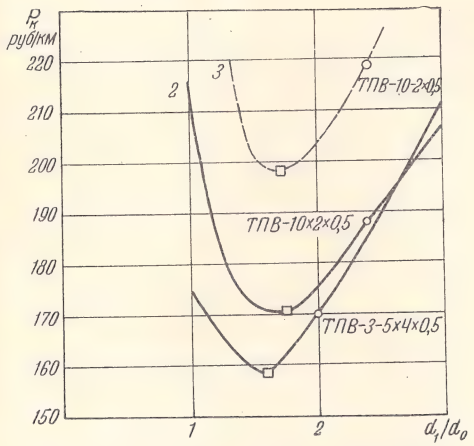

Рис. 3.2. Зависимость стоимости десятипарного кабеля типа ТПВ от d_1/d_0 при $\alpha=1{,}3$ *дб/км* и $f=0{,}8$ *кгц*:
1 — кабель звездной скрутки; *2* — кабель парной скрутки;
3 — кабель парной скрутки с учетом стоимости канализации;
□ — конструкции минимальной стоимости;
○ — существующие конструкции

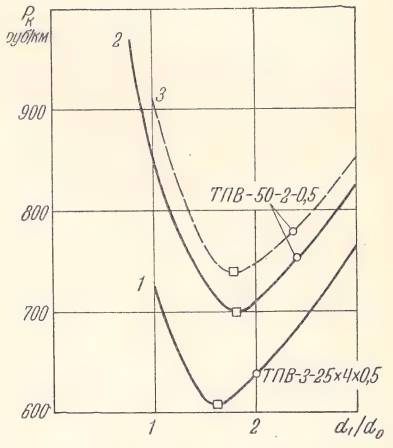

Рис. 3.3. Зависимость стоимости пятидесятипарного кабеля типа ТПВ-3 от d_1/d_0 при $\alpha=1{,}3$ *дб/км* и $f=0{,}8$ *кгц*:
1 — кабель звездной скрутки; *2* — кабель парной скрутки; *3* — кабель парной скрутки с учетом стоимости канализации;
□ — конструкции минимальной стоимости; ○ — существующие конструкции

и $f=0{,}8$ *кгц* от соотношения d_1/d_0 для десятипарного (пятичетверочного) и пятидесятипарного (двадцатипятичетверочного) кабелей при принятых ценах на материалы. Стоимости $P_к$ имеют минимумы при $(d_1/d_0)_{опт}\approx 1{,}6\div 1{,}8)$.. Из сравнения рис. 3.2 и 3.3 видно, что величины оптимальных соотношений практически не зависят от емкости (количества цепей кабеля).

Соотношения d_1/d_0 в существующих конструкциях близки к оптимальным, однако имеется возможность снизить стоимость кабеля на 5—15%, применив жилу несколько большего диаметра и изоляцию меньшей толщины. В частности, применением $d_0\approx 0{,}55$ *мм* и сплошной полиэтиленовой изоляции толщиной 0,5 *мм* (вместо применяемых 0,5 *мм* и 0,6 *мм* соответственно) можно при той же величине затухания уменьшить стоимость кабеля примерно на 10%.

Можно показать, что при существующих конструктивных и стоимостных соотношениях увеличение стоимости оболочки и изоляции и уменьшение стоимости жил (меди) кабелей ГТС приводит к смещению оптимальных величин d_1/d_0 в сторону меньших значений, хотя эта зависимость практически не сильно выражена.

При существующих ценах на исходные материалы и применяемых обычно величинах соотношения d_1/d_0 звездная скрутка эконо-

гичных по конструкции кабелям ГТС с полиэтиленовой изоляцией типа ТП) при $\alpha=\text{const}$ (на рисунке $\alpha \approx 1{,}3$ *дб/км* при частоте 0,8 *кгц* — эта величина коэффициента затухания получается для кабелей типа ТП с жилами диаметром 0,5 *мм* при современных нормах на величины рабочей емкости и сопротивления жил). Кружками показаны значения α для существующих конструкций кабелей ($d_0=0{,}5$ *мм*).

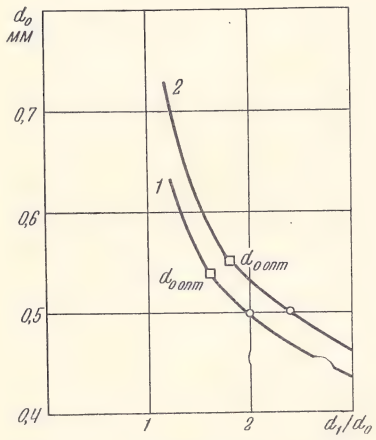

Рис. 3.1. Конструктивные соотношения для цепей низкочастотных кабелей ГТС типа ТП звездной *(1)* и парной *(2)* скрутки при $\alpha=1{,}3$ *дб/км*, $f=0{,}8$ *кгц*:
□ — конструкции минимальной стоимости;
○ — существующие конструкции

Таким образом, одни и те же величины электрических характеристик могут быть получены при различных конструктивных соотношениях в кабеле. В то же время стоимость кабеля определяется суммой стоимостей жил и изоляции (а также других элементов кабеля) и будет различна при разных соотношениях диаметра жил и толщины изоляции. При определенных соотношениях стоимость кабеля может быть минимальной.

Зависимость стоимости низкочастотного кабеля от конструктивных характеристик и коэффициента затухания задается ф-лой (2.54). В качестве независимых переменных в ф-ле (2.54) выступают α и d_1/d_0 (d_0 в неявном виде входит в α), и поскольку по условию задачи α фиксируется, необходимо исследовать зависимость стоимости кабеля от d_1/d_0 при $\alpha=\text{const}$. Таким образом, выражение (2.54) рассматривается как функция одной переменной (d_1/d_0).

Оптимальная величина соотношения $(d_1/d_0)_{опт}$ может определяться из уравнения, полученного приравнением нулю производной от функции (2.54) по d_1/d_0 при $\alpha=\text{const}$:

$$\frac{\partial P_к}{\partial\left(\frac{d_1}{d_0}\right)}=0. \qquad (3.1)$$

Другой возможностью являются определение $(d_1/d_0)_{опт}$ путем непосредственного расчета и построение соответствующих графических зависимостей $P_к$, позволяющих отыскать местоположение минимума стоимости.

Последний способ часто оказывается предпочтительней, так как дает возможность не только определить точку минимума, но и исследовать функцию стоимости в его окрестностях, что оказывается полезным при необходимости отступления от минимума из-за различного рода дополнительных условий, при оценке необходимой точности соблюдения выбранных соотношений, учете разброса параметров, погрешностей расчета и измерения, изменении цен и других факторах.

ТАБЛИЦА 2.4

Некоторые характеристики отечественных систем уплотнения линий дальней связи

Система уплотнения	Схема организации связи	Тип цепи	Линейный спектр *кгц*	Построение спектра из многоканальных групп	Число октав линейного спектра	Полоса частот на канал *кгц*
К-24	двухкабельная однополосная	симметричная	12÷108	2 ПГ	3,17	4
К-60	то же	то же	12÷252	1 ВГ=5 ПГ	4,41	4
К-300	однокабельная однополосная	коаксиальная	60÷1300	5 ВГ=5×5 ПГ	4,45	4,13
К-1920	то же	то же	312÷8524	6 ТГ+2 ВГ==6×5×5 ПГ++2×5 ПГ	4,8	4,28

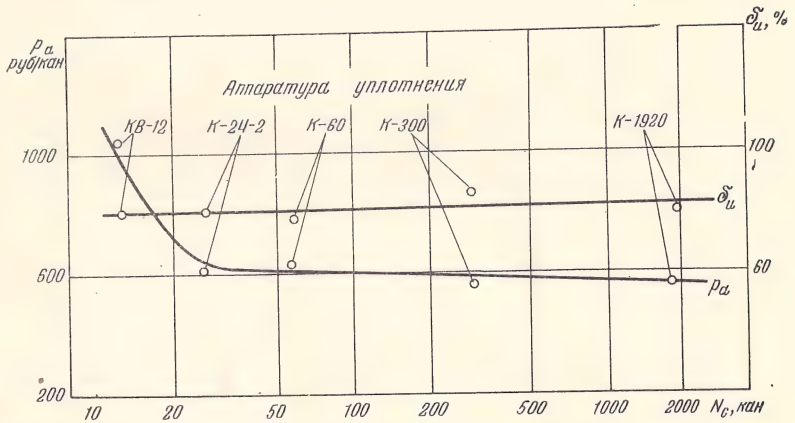

Рис. 2.4. Стоимостные показатели оконечного оборудования аппаратуры уплотнения кабельных линий связи

полученными для зарубежных систем уплотнения, в том числе мощностью больше 10 000 каналов [3].

В результате для расчета стоимости оконечного оборудования многоканальных систем уплотнения как функции от мощности системы можно предложить простую формулу, по структуре аналогичную ф-ле (2.5):

$$P_a(N_c)=u_a(N_c)+v_a(N_c)N_c, \qquad (2.56)$$

где $u_a(N_c)$, $v_a(N_c)$ — коэффициенты.

Величина коэффициента $u_a(N_c)$ может включать затраты на вводно-коммутационное оборудование, оборудование служебной связи, дистанционного питания. С увеличением N_c доля постоянных затрат, приходящаяся на один канал, уменьшается и при достаточно большом N_c становится весьма малой.

Как следует из рис. 2.4, коэффициент $v_a(N_c)$ для различных многоканальных систем изменяется весьма незначительно. Согласно проведенным ориентировочным расчетам (в ценах 1967 г.) $v_a(N_c) \approx 550 \div 600$ *руб/кан* (на обе оконечные станции). Такого же порядка величина и для существующих отечественных систем с ИКМ.

Для многоканальных систем уплотнения, построенных на аналогичных технических принципах, затраты на один канал в оконечном оборудовании многоканальных систем будут примерно одинаковыми. Поэтому при сравнении различных вариантов аппаратуры уплотнения расходы на оконечное оборудование могут быть исключены из рассмотрения. Этот вывод не относится к системам, построенным на разных технических принципах, а также к малоканальным системам. Такие системы уплотнения используются, главным образом, на соединительных линиях ГТС и сельской телефонной связи (СТС). Эти системы, как правило, однокабельные двухполосные, предназначены для связи на небольшие расстояния; в них полоса частот, отводимая на один канал, может быть шире стандартной. Расширение полосы частот, отводимой на канал, приводит к существенному удешевлению полосовых фильтров каналов либо создает возможность их упразднения путем применения других, более экономичных технических решений (например, использование фазоразностных схем, как это сделано в аппаратуре типа КНК-6 и КРР); при этом существенно уменьшается стоимость системы в целом.

В качестве примера на рис. 2.5 показаны точками удельные стоимости оконечного оборудования систем передачи, необходимого для организации 24 каналов по однокабельной двухполосной системе с помощью аппаратуры типа КРР-30, КНК-6 (четыре комплекта) и КВ-12 (два комплекта), в зависимости от ширины полосы частот, отводимой на канал Δ.

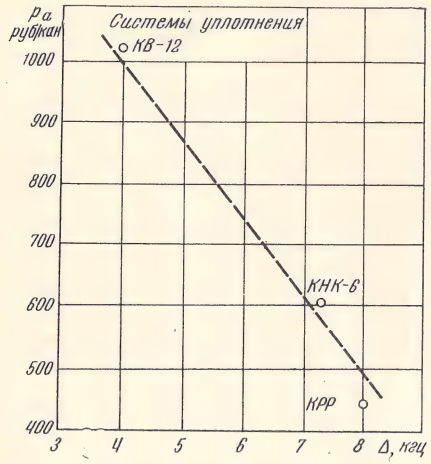

Рис. 2.5. Зависимость между удельной стоимостью оконечного оборудования систем уплотнения (при организации пучка в 24 канала) от полосы частот, отводимой на канал

Анализ существующей аппаратуры показывает, что стоимость оконечного оборудования системы уплотнения как функция ширины полосы частот, отводимой на канал, ориентировочно может быть принята пропорциональной этой ширине:

$$P_a(\Delta) = u_a(\Delta) + v_a(\Delta)\Delta, \quad (2.57)$$

где $u_a(\Delta)$, $v_a(\Delta)$ — коэффициенты.

Этот вывод подтверждается данными, показанными на рис. 2.5. Параметры пунктирной прямой вычислены по методу наименьших квадратов и составляют $u_a(\Delta) = 1540$ *руб/кан*, $v_a(\Delta) = 120$ *руб/кан·кгц*.

При оценке затрат на НУП следует учитывать

На абонентских линиях ГТС и СТС применяются низкочастотные кабели. В этом случае в выражении (1.6) выпадают слагаемые, учитывающие наличие аппаратуры уплотнения, и возникают специфические проблемы ограничения дальности связи, наличия телефонной канализации (на ГТС) и др.

3.2. Выбор параметров цепей низкочастотных кабелей для городских телефонных сетей

Технико-экономической эффективности кабелей ГТС должно уделяться особое внимание, так как в общей сумме затрат на строительство ГТС расходы на линейные сооружения составляют около 45%.

Кабели ГТС используются для передачи разговорных токов в тональном диапазоне частот, вызывных сигналов и постоянных токов управления соединением и питания микрофонов.

Нормирование электрических характеристик цепей производится, исходя из требований, предъявляемых к кабельным линиям ГТС и регламентируемых рекомендациями МККТТ, нормами технологического проектирования, соответствующими инструкциями и правилами. Эти требования задаются на всю длину линии в виде частотных характеристик затухания и волнового сопротивления и сопротивления цепи постоянному току и могут быть различными для разных типов абонентских и соединительных линий.

Таким образом, задача технико-экономической оптимизации кабелей ГТС сводится к выбору параметров цепей, обеспечивающих заданные величины коэффициента затухания, волнового сопротивления рабочей емкости и сопротивления постоянному току при минимальной стоимости и диаметре кабеля (последнее позволяет уменьшить расходы на телефонную канализацию).

В общем случае расчет конструкций низкочастотных кабелей может производиться в соответствии с ф-лами (2.19), (2.32) с учетом (2.23), (2.46), (2.47).

Как видно из ф-л (2.46) и (2.47), чтобы задать частотные характеристики коэффициента затухания и волнового сопротивления, достаточно задаться одной из точек на этих характеристиках. Для получения заданной величины α или $Z_в$ достаточно соответствующим образом выбрать любой из конструктивных параметров (практически d_0 или d_1/d_0).

При необходимости получения заданных характеристик одновременно для α и $Z_в$ производится совместное решение ур-ний (2.46) и (2.47). В этом случае при заданных материале изоляции и жил и конструкции кабеля определяются как диаметр неизолированной жилы, так и толщина изоляции.

Это обстоятельство имеет наглядное физическое объяснение. Действительно, как следует из выражений (2.44) и (2.45), заданные величины α или $Z_в$ могут быть получены при различных величинах сопротивления постоянному току R_0, с одной стороны, и рабочей емкости $C_р$ — с другой. При данной конструкции кабеля и частоте величина R_0 определяется диаметром жил, а $C_р$ — главным образом, толщиной изоляции. Поэтому заданная величина α, например, может быть получена различными способами: путем уменьшения диаметра неизолированной жилы и увеличения толщины изоляции. В качестве примера на рис. 3.1 представлена зависимость между величинами d_0 и d_1/d_0 для кабелей парной и звездной скрутки (анало-

ТАБЛИЦА 3.1

Тип сети	Тип цепи	Схема организации связи	Типы кабелей	Системы уплотнения	Диапазон уплотнения $M_{гц}$	Дальность связи *км* макс.	Дальность связи *км* средняя	Емкость пучков *каналов* макс.	Емкость пучков *каналов* средняя
ДС	симметричная коаксиальная	двухжильная четырехпроводная	МКС	К-60	0,25	не ограничена	1000	800	400
		одножильная четырехпроводная	КМ, МКТП	К-1920, К-300	8,5; 1,3			10 000	2 000
ЗС	симметричная коаксиальная	двухжильная четырехпроводная,	МКПБ	К-24П, К-60П	0,108; 0,25	600	200	300	120
		одножильная двухпроводная		КВ-12	0,143				
		одножильная двухпроводная	ВКПП	К-120	1,3			120	120
СТС, соединительная линия	симметричная	одножильная, двухпроводная	КСПП	КНК-6; КРР	ня; 0,120; 0,550	100	30	50	12
		одножильная четырехпроводная		ИКМ-12	0,71)				
СТС, абонентские линии	симметричная	одножильная двухпроводная	ПР; ТП	—	ня	20	5	50	10
ГТС, соединительные линии	симметричная	одножильная двухпроводная	Т; ТП: МКС	КРР	ня; 0,550	50	10	1000	120
		одножильная четырехпроводная		ИКМ-24	1,51)				
ГТС, абонентские линии	симметричная	одножильная двухпроводная	Т; ТП	—	ня	5	2	2400	100

1) Для систем с ИКМ.

ширину линейного спектра и расположение его по шкале частот, комплектацию и количество НУП.

В соответствии с рекомендациями МККТТ ширина спектра, отводимого на один канал частотных систем дальней связи, с учетом расфильтровки каналов составляет, как правило, 4 *кгц*. Для систем с числом каналов свыше 60 полоса частот, приходящаяся на канал, несколько выше 4 *кгц*, так как учитываются дополнительные частотные промежутки на расфильтровку многоканальных групп. Для систем уплотнения симметричных кабелей дальней связи этим расширением полосы частот можно пренебречь (см. табл. 2.5) и считать ее независимой от числа каналов и равной 4 *кгц*, а ширину линейного спектра системы равной

$$\Delta_л = N_с \Delta = 4N_с, \text{ кгц}. \qquad (2.58)$$

Для систем уплотнения коаксиальных кабелей необходимо считаться с расширением полосы на канал тем больше, чем больше $N_с$ (вследствие потерь полосы частот на расфильтровку вторичных и третичных групп).

Как показывает анализ существующих отечественных и зарубежных систем уплотнения коаксиальных кабелей связи (емкостью от 120 до 10 800 каналов), для расчета ширины полосы частот на канал можно предложить эмпирическую зависимость

$$\Delta = 4 + (7 \div 8) \cdot 10^{-3} \sqrt{N_с}, \text{ кгц}. \qquad (2.59)$$

Ширина линейного спектра систем уплотнения коаксиальных кабелей связи.

$$\Delta_л = \Delta N_с = [4 + (7 \div 8) \cdot 10^{-3} \sqrt{N_с}] N_с, \text{ кгц}. \qquad (2.60)$$

Для расчета линейного тракта: кабелей связи и промежуточных усилителей — наряду с шириной линейного спектра существенное значение имеет расположение его на шкале частот; этим определяются такие важные величины, как количество октав, нижняя и верхняя частоты полосы передачи $f_н$ и $f_в$.

Число октав линейного спектра определяется логарифмом отношения верхней частоты спектра к нижней при основании 2, т. е. равно $\log_2\left(\frac{f_в}{f_н}\right)$.

Как известно, с точки зрения уменьшения стоимости промежуточных усилителей желательно иметь возможно меньшее число октав в передаваемом спектре. Например, при повышении и понижении передаваемых частот свыше определенных пределов уменьшение усиления основного типа каскада предварительного усиления — резисторного каскада — стремится к пределу — 6 *дб* на октаву [19].

При заданной величине $\Delta_л$ уменьшения количества октав можно добиться, перемещая передаваемый линейный спектр вверх по диапазону частот. При этом возрастают $f_н$ и $f_в$. При возрастании $f_в$ уменьшается длина усилительных участков и, следовательно, возрастает число усилителей. Соответствующие количественные соотношения приводятся ниже.

С другой стороны, частотная характеристика волнового сопротивления и затухания цепей кабелей связи имеет весьма неблагоприятный характер в области низких частот. Поэтому с точки зрения согласования характеристик аппаратуры и линии $f_н$ не должна быть очень малой.

При организации проводной связи важную роль играют также вопросы уменьшения взаимных влияний. В этом отношении возможности линий связи также существенно зависят от расположения передаваемого спектра на шкале частот, причем для симметричных кабелей неблагоприятными являются верхние частоты, а для коаксиальных — нижние.

Поэтому симметричные кабели уплотняются, как правило, в диапазоне частот не ниже 12 *кгц* и не выше 250 *кгц* (в отдельных системах — до 550 *кгц*).

Этот вывод относится, главным образом, к частотным системам дальней связи. В некоторых типах малоканальных систем, а также для систем, основанных на других технических принципах (например, на ИКМ), могут использоваться частоты за пределами указанного диапазона.

Для коаксиальных кабелей практически ограничивается лишь нижняя частота линейного спектра, составляющая, как правило, 60 *кгц* для малогабаритных и 300 *кгц* для нормальных коаксиальных пар.

С учетом всех отмеченных факторов наиболее выгодной в настоящее время считается ширина полосы линейного спектра 4—5 октав.

Необходимое для передачи в каком-либо направлении количество каналов определяется объективно существующей потребностью в связи и для решения рассматриваемых в настоящей работе задач может быть принято заданным.

Возникает задача выбора соотношения между количеством и мощностью систем уплотнения и связанных с этими параметрами: высшей частотой линейного спектра и количеством уплотняемых цепей. Поскольку удельную стоимость оконечной аппаратуры (на канал) можно принять независимой от мощности системы, решение этой задачи определяется линейным трактом и существенно зависит от изменения стоимости кабеля и промежуточных усилителей при изменении количества систем (кабельных цепей) и верхней частоты линейного спектра.

Зависимость стоимости кабеля от числа цепей задается ф-лой (2.5), причем величины входящих в нее коэффициентов могут быть определены из выражений (2.13)—(2.15).

Определение зависимости стоимости кабеля от частоты и коэффициента затухания производится из выражений (2.53)—(2.55).

С увеличением верхней частоты и ширины линейного спектра возрастает стоимость и уменьшается усиление транзисторов, повышаются требования к другим элементам усилителей, в результате чего следует ожидать увеличения стоимости промежуточных усилительных станций.

При увеличении верхней частоты передаваемого спектра увеличивается затухание линий и возрастает количество усилителей на магистрали. В этом случае существенное значение имеет источник помех. Если основные помехи в линейный тракт вносятся усилителями (это имеет место, например, у многоканальных частотных систем уплотнения коаксиальных кабелей, когда уровень тепловых шумов значительно выше других шумов), при возрастании количества усилителей необходимо принимать меры для сохранения необходимого соотношения сигнал/шум, что приводит к удорожанию усилителей. Кроме того, при передаче бо́льшего количества каналов для сохранения прежней величины уровня сигнала в каждом канале (при этом сохраняется необходимое соотношение сигнал/шум) также приходится увеличивать мощность усилителя. Увеличение

ляются двумя действительно независимыми переменными. Однако расчет стоимости кабеля с подстановкой этих выражений приводит к весьма громоздким, неудобным для анализа выражениям, не отражающим зависимость стоимости от требуемой величины коэффициента затухания. Поэтому в ф-лах (2.53) и (2.54) вместо двух указанных представлены три переменные — d_0, d_1/d_0 и α, которые уже не являются независимыми в строгом смысле слова, и уравнение связи между ними задается ф-лами (2.41) и (2.46). В этом случае, как отмечалось выше, задача сводится к нахождению условного минимума, причем в роли условно независимых переменных остаются d_1/d_0 и α и частные производные должны браться по ним.

Для рассматриваемого случая стоимости кабеля — понятие условного экстремума имеет простую и наглядную физическую интерпретацию. Рассмотрим, например, частную производную $\frac{\partial P_{ск}}{\partial\left(\frac{d_1}{d_0}\right)}$ при $\alpha = \text{const}$, отражающую зависимость стоимости кабеля от конструктивного соотношения d_1/d_0 при постоянной величине коэффициента затухания. Если бы переменные d_1/d_0 и α были независимыми, то, задавшись величиной α и изменяя d_1/d_0, можно получить зависимость стоимости кабеля от d_1/d_0. Но α сама является функцией d_1/d_0, так что изменение этого соотношения приводит также и к изменению α, и запись производной в приведенном виде, на первый взгляд, представляется бессмысленной. Однако поскольку α является функцией не только d_1/d_0, но и d_0, всегда имеется возможность при изменении d_1/d_0 оставить α неизменной путем соответствующего изменения d_0 в соответствии с ф-лами (2.50), (2,51). Таким образом, переменные d_1/d_0 и α могут условно считаться независимыми.

Второе выражение системы (1.9) отражает ограничения и дополнительные условия конкретной задачи, например требование заданных частотных характеристик параметров передачи и влияния и пр., которые в значительной степени определяются типом линии.

Как известно, сети связи страны подразделяются на междугородные — дальней связи (ДС), зоновые сети (ЗС), городские (ГТС) и сельские (СТС) Ориентировочные значения некоторых характеристик существующих линий связи приведены в табл. 3.1.

На магистралях дальней связи применяются, как правило, мощные системы уплотнения в сочетании с относительно малопарными кабелями (симметричными и коаксиальными), на линиях устанавливается большое количество НУП и ОУП.

На линиях ЗС используются в основном одночетверочные и однокоаксиальные кабели, количество ОУП не превышает 1—2, число НУП остается достаточно большое.

На линиях ДС и ЗС в настоящее время используются исключительно частотные системы с отводимой на канал шириной полосы частот, равной 4 *кгц*.

Для соединительных линий ГТС и СТС характерна небольшая протяженность, ОУП отсутствуют и могут быть исключены из рассмотрения. Количество НУП, особенно для линий ГТС, ограниченно. Как правило, на ГТС используется однокабельная двух- и четырехпроводная система. На соединительных линиях СТС применяется аппаратура уплотнения и специальные высокочастотные кабели связи с жилами диаметром 0,9 и 1,2 *мм*. На соединительных линиях ГТС могут уплотняться либо низкочастотные многопарные кабели, либо междугородные симметричные кабели.

3. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАГИСТРАЛЕЙ И КАБЕЛЕЙ СВЯЗИ

3.1. Общие положения

В предыдущих главах дано теоретическое обоснование методики расчета оптимальных характеристик оборудования проводной связи и получен ряд зависимостей, необходимых для осуществления таких расчетов. Для иллюстрации основных теоретических положений в настоящей главе рассматривается ряд примеров решения задач технико-экономической оптимизации магистралей и кабелей связи. Приводимые примеры не претендуют на полноту изложения ни по охвату всех возможных задач, ни по степени раскрытия каждой из них. Основной целью этого раздела является иллюстрация некоторых возможностей метода при рассмотрении ряда практических задач и указании порядка получения решений.

Общность моделей в примерах ограничена уровнем отдельной линии или высокочастотной магистрали связи, а сложность исследованных моделей не превышает 3—6 оптимизируемых параметров.

Все примеры базируются на существующем или разрабатываемом оборудовании связи, анализ моделей проводится для реальных ситуаций при реальных соотношениях коэффициентов, электрических и экономических параметров, а расчеты доведены до численных результатов. В этом смысле рассмотренные примеры могут представлять определенный практический интерес. Однако построение и анализ моделей для других, аналогичных задач не имеет принципиальных отличий по сравнению с рассмотренными примерами.

Все рассмотренные примеры относятся к области связи общего пользования. Поэтому в качестве критерия оптимизации используется показатель приведенных затрат или его частные случаи.

В качестве исходного выражения для построения математических моделей используется ф-ла (1.6), отражающая (с учетом формул, приведенных в гл. 1 и 2) зависимость годовых приведенных затрат на кабельную магистраль от электрических, конструктивных и стоимостных показателей кабелей, аппаратуры уплотнения и усиления и магистрали в целом. Функцию приведенных затрат исследуют согласно системе ур-ний (1.9) во всей области определения и на ее границах, причем оптимизируемые параметры рассматриваются в качестве независимых переменных, а задаваемые характеристики представляют константы.

Важность правильного выбора независимых переменных подчеркивалась выше, здесь же проиллюстрируем это положение на примере рассмотрения характеристик симметричного кабеля связи. При заданных конструкциях внешних защитных покровов и количестве цепей стоимость симметричного кабеля фактически определяется диаметром неизолированной жилы и толщиной изоляции, которые и яв-

мощности и усиления возможно лишь до определенных пределов, связанных как со свойствами применяемых активных элементов и схем, так и с требованиями к линейности характеристик допустимыми влияниями и т. п. Детальное теоретическое рассмотрение этого вопроса чрезвычайно затруднительно. Практически с достаточной точностью зависимость стоимости НУП может быть принята пропорциональной корню квадратному из верхней частоты линейного спектра:

$$P_{н}(f_{в}) = u_{н}(f_{в}) + v_{н}(f)\sqrt{f_{в}}, \qquad (2.61)$$

где $u_{н}(f_{в})$, $v_{н}(f_{в})$ — коэффициенты.

Для существующих систем уплотнения кабельных линий дальней связи (табл. 2.4) в случае размещения в контейнере НУП комплекта усилителей на две системы (4 усилителя) $u_{н}(f_{в}) \approx 450$ руб. $v_{н}(f_{в}) \approx 100$ руб. Сравнение результатов расчета по ф-ле (2.61) со справочными данными для отечественных систем уплотнения свидетельствует о достаточно хорошем совпадении, несмотря на значительное различие в мощности, конструкции и других характеристиках систем (рис. 2.6).

Как показывает анализ существующих систем уплотнения, при увеличении количества усилителей, размещенных в контейнере НУП, стоимость НУП возрастает пропорционально числу систем:

$$P_{н}(q) = u_{н}(q) + v_{н}(q)\frac{q}{\mu}, \qquad (2.62)$$

где $u_{н}(q)$, $v_{н}(q)$ — коэффициенты; q/μ — число систем, выраженное через число жил кабеля q; $\mu = 2$ либо 4 соответственно для двух- или четырехпроводной схемы связи.

Величины коэффициентов $u_{н}(q)$ и $v_{н}(q)$ определяются типом системы, линейным спектром и др. Например, для НУП системы К-60П-4 $u_{н}(q) = 750$ руб, $v_{н}(q) \approx 500$ руб. [17].

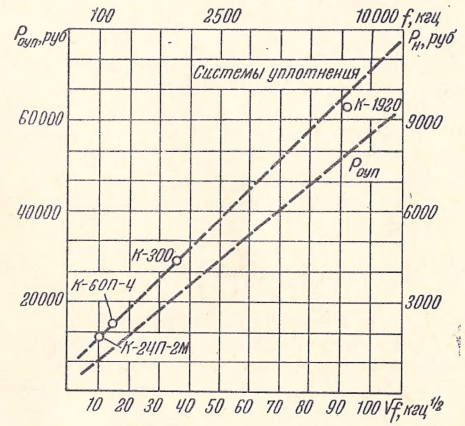

Рис. 2.6. Зависимость стоимости усилительных пунктов аппаратуры дальней связи — одного ОУП и одного НУП — от верхней частоты линейного спектра

Выражение (2.62) справедливо как для НУП в целом, так и для отдельных стоек, совмещающих несколько усилителей или систем. В частности, для универсальных стоек промежуточных усилителей, выпускаемых на 1, 2, 4 комплекта промежуточных дуплексных усилителей аппаратуры К-24-60, $u_{н}(q) = 340$ руб, $v_{н}(q) = 530$ руб.

Аналогичным образом можно рассчитать и стоимость оконечных малоканальных систем, совмещаемых на одной стойке:

$$P_{а}(q) = u_{а}(q) + v_{а}(q)\frac{q}{\mu}. \qquad (2.63)$$

Например, для аппаратуры КНК-6Т, выпускаемой в комплектах по 1, 2, 4 системы на одной стойке, $u_а(q) \approx 7000$ руб., $v_а(q) \approx 2500$ руб.

Такие же зависимости существуют и для оборудования ОУП, стоимость которых может быть принята пропорциональной корню квадратному из верхней частоты (рис. 2.6):

$$P_{ОУП}(f_в) = v_{ОУП}(f)\sqrt{f_в}, \qquad (2.64)$$

где для существующих отечественных систем дальней связи величина $v_{ОУП}(f_в) = 600$ руб., $f_в$ — в *кгц*.

Сравнение результатов расчетов по приведенным в настоящей главе формулам со справочными данными показывает, что расхождение результатов, как правило, не превышает 5%.

При решении некоторых задач оптимизации промежуточного усилительного оборудования возникает необходимость в определении зависимости стоимости усилителя от коэффициента усиления. Очевидно, при прочих равных условиях стоимость усилителя тем больше, чем выше его усиление. При заданном типе усилительного элемента и схеме каскада коэффициент усиления по напряжению K^* многокаскадного усилителя равен сумме коэффициентов усиления его каскадов (в дБ) [19].

В усилителях дальней связи зависимость стоимости оказывается более сложной, так как в них используется глубокая отрицательная обратная связь, применяется коррекция отдельных частотных диапазонов и т. д. Следует отметить, что в промежуточных усилителях систем дальней связи возможные пределы изменения усиления весьма ограничены допускаемыми величинами входных и выходных уровней, требованиями к защищенности от влияния других систем и мешающему действию на них.

В результате стоимость усилителя оказывается пропорциональной его усилению:

$$P_н(K^*) = u_н(K^*) + v_н(K^*)\,K^*, \qquad (2.65)$$

где $u_н(K^*)$ и $v_н(K^*)$ — коэффициенты.

При решении ряда задач оптимизации параметров магистралей связи часто возникает необходимость в выражениях, отражающих зависимость стоимости аппаратуры одновременно от нескольких из рассмотренных выше параметров. Эти выражения могут быть получены из предложенных формул. Зависимость стоимости промежуточных усилительных пунктов одновременно от количества усилителей и верхней частоты усиливаемого спектра может быть получена из ф-лы (2.61) и (2.62), причем ввиду линейности объединяемых формул зависимость от соответствующих переменных в общем выражении также будет линейной и может быть определена в виде

$$P_н(q,\ f_н) = U_н(q, f_в)\left[u_н(q, f_в) + \sqrt{f_в}\right]\left[v_н(q, f_н) + \frac{q}{\mu}\right], \qquad (2.66)$$

где $u_н(q, f_в) = u_н(f_в)/v_н(f_в)$; $v_н(q, f_в) = u_н(q)/v_н(q)$; $U_н(q, f_в)$ —

— коэффициент, согласующий результаты расчетов по ф-лам (2.66), (2.61) и (2.62).

Количество НУП $n_п = n - n_{ОУП}$, однако, если $n_п \gg n n_{ОУП}$, то $n_м \approx n_{ОУП}$

Соответствующие выражения могут быть получены и для других схем включения и систем питания НУП.

Так как при разработке кабеля и аппаратуры и типовом проектировании магистралей невозможно заранее точно указать длину линий, на которых они будут использоваться (в этом и нет необходимости, так как аппаратура и кабель не могут проектироваться и конструироваться под каждую магистраль), выражения (2.74)—(2.76) можно использовать и в общем случае, когда длина линии не кратна $l_у$.

Лишь в случаях, когда предусматривается использование разрабатываемых или выбираемых типов кабелей и аппаратуры на заведомо коротких линиях длиной $l_м = (1 \div 2) l_у$ (ГТС, СТС), следует учитывать, что зависимость количества усилительных пунктов от длины линии имеет вид функции, периодически возрастающей скачками (на единицу) при увеличении протяженности линии.

Такую функцию можно представить с помощью рядов Фурье. В этом случае, например, вместо (2.74) получаем

$$n = \frac{l_м}{l_у} - \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi}\sum_{v=1}^{\infty}\frac{\sin v\frac{l_м}{l_у}2\pi}{v} =$$

$$= l_м\frac{\alpha}{a_у} - \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi}\sum_{v=1}^{\infty}\frac{\sin v l_м\frac{\alpha}{a_у}2\pi}{v}. \qquad (2.77)$$

При использовании выражения (2.77) округление до ближайшего целого числа происходит автоматически, причем сходимость рядов такова, что можно ограничиться первыми 5—10 членами.

◆

Величина сопротивления кабеля постоянному току $R_к$ на питаемом участке зависит от системы питания. Для наиболее часто применяемой системы «пара—земля»

$$R_{кпз} = \frac{1}{4} R_0 \frac{a_у}{\alpha} n_п,$$

для системы «провод—провод»

$$R_{кпп} = R_0 \frac{a_у}{\alpha} n_п.$$

Сопротивление усилителей плеча питания постоянному току зависит от схемы их включения, которая может быть раздельной, параллельной или последовательной. Например, в последнем случае, чаще всего применяющемся для НУП на полупроводниках, обозначая сопротивление одного НУП постоянному току через r_0, получаем сопротивление для $n_п$ НУП: $R_н = r_0 n_п$. Аналогичным образом можно найти сопротивление и при других схемах включения НУП.

Общее сопротивление плеча питания, например, при последовательной схеме и системе «провод—провод»

$$R_п = R_к + R_н = n_п \left(R_0 \frac{a_у}{\alpha} + r_0 \right).$$

Максимально допустимое общее сопротивление плеча питания постоянному току составляет $R_{д0} = U/I$, где U, I — напряжение и ток дистанционного питания. При этом на магистрали должно соблюдаться условие

$$R_{д0} \geqslant R_п = n_п \left(R_0 \frac{a_у}{\alpha} + r_0 \right).$$

Отсюда максимальное количество НУП между двумя питающими станциями

$$n_у = 2n_п = \frac{R_{д0}}{R_0 \frac{a_у}{\alpha} + r_0}.$$

Если общее количество УП на магистрали n кратно $n_у$, то количество ОУП на магистрали

$$n_{ОУП} = \frac{n}{n_у} - 1 = \left(\frac{\alpha l_м}{a_у} - 1 \right) \frac{R_0 \frac{a_у}{\alpha} + r_0}{R_{д0}} - 1. \qquad (2.75)$$

Учитывая, что установка ОУП производится при $l_м \gg l_у$ и $n_п \gg 1$, выражение (2.75) можно упростить:

$$n_{ОУП} \approx \frac{l_м \left(R_0 + r_0 \frac{\alpha}{a_у} \right)}{R_{д0}} - 1 = \frac{l_м \left(R_0 + r_0 \frac{\alpha}{(7 \div 9) - \frac{1}{2} \ln N_с} \right)}{R_{д0}} - 1. \qquad (2.76)$$

При указанных выше значениях коэффициентов $u_н(q)$, $v_н(q)$, $u_н(f_в)$, $v_н(f_в)$ для современных систем дальней связи ориентировочно получаем

$$P_н(q, f_н) \approx 30 (5 + \sqrt{f_в}) \left(1{,}5 + \frac{q}{\mu} \right), \text{ руб.} \qquad (2.67)$$

где $f_в$ — в *кгц*.

Представляет интерес также выражение стоимости НУП непосредственно в зависимости от количества каналов в системе. Это может быть сделано путем подстановки в ф-лу (2.67) частоты $f_н$, выраженной через мощность системы в соответствии с ф-лами (2.58) и (2.60).

Например, для систем уплотнения симметричных кабелей, принимая в соответствии с вышеизложенными рекомендациями (см. стр. 45) число октав, равное 5, можно записать:

$$\frac{f_в}{f_н} = \frac{f_в}{f_в - 4N_с} = 2^5,$$

откуда

$$f_в = 4{,}12 N_с, \text{ кгц}. \qquad (2.68)$$

В результате из ф-л (2.67) и (2.68) получаем

$$P_н(q, f_в) \approx 61 (2{,}46 + \sqrt{N_с}) \left(1{,}5 + \frac{q}{\mu} \right), \text{ руб.} \qquad (2.69)$$

С помощью (2.68) при проведении расчетов стоимости кабеля также может быть выражена в зависимости от мощности и количества систем уплотнения (числа цепей или жил в кабеле). Например, для симметричного высокочастотного кабеля из выражения (2.53) получаем

$$P_{ск} = \varkappa\pi \left\{ \frac{1{,}48 \cdot 10^{-3} \left[1 + \frac{h}{2 \left(\xi \frac{d_1}{d_0} \right)^2} \right]}{\frac{\alpha}{\chi \sqrt{\varepsilon_э N_с}} \ln \left| 2\xi \frac{d_1}{d_0} \psi \right| - 19{,}0 \cdot 10^{-6} \left(R'_ж + R'_э \right)} \right\}^2 \times$$

$$\times \left\{ \frac{q}{4} \left[\gamma_ж p_ж + \gamma_и P_и \left(\left(\frac{d_1}{d_0} \right)^2 - 1 \right) \right] + \right.$$

$$\left. + F \zeta \frac{d_1}{d_0} \frac{\frac{\alpha}{\chi \sqrt{\varepsilon_э N_с}} \ln \left| 2\xi \frac{d_1}{d_0} \psi \right| - 19 \cdot 10^{-6} \left(R'_ж + R'_э \right)}{1{,}48 \cdot 10^{-3} \left[1 + \frac{h}{2 \left(\xi \frac{d_1}{d_0} \right)^2} \right]} \times \right.$$

$$\left. \times \sum \gamma_i p_i t_i \right\}. \qquad (2.70)$$

При двухполосной системе связи в ф-лы (2.68)—(2.70) вместо $N_с$ необходимо подставить $2N_с$.

Из выражения (2.55) с учетом ф-л (2.60), (2.67) можно получить аналогичные выражения для стоимости коаксиальных кабелей.

2.5. Зависимость количества промежуточных усилительных пунктов на магистрали от характеристик кабелей и аппаратуры уплотнения

Так как суммарные затраты на промежуточное усилительное оборудование определяются как стоимостью, так и количеством усилительных пунктов, частота размещения промежуточных усилителей существенно влияет на экономичность системы связи в целом.

Как известно, длина усилительного участка определяется многими факторами: параметрами высокочастотных сигналов и допустимыми шумами (тепловыми, нелинейными, переходными, от внешних источников), принципами построения аппаратуры (способ модуляции, наличие ограничителей, предыскажений, свойства активных и пассивных элементов, схемные решения), погрешностями при регулировке уровня и коррекции искажений, количеством одновременно работающих систем и каналов, наличием и системой автоматической регулировки уровня, а также свойствами кабеля. Большинство этих характеристик жестко регламентируется МККТТ. Длина усилительного участка связана с этими характеристиками сложными зависимостями, однако путем различного рода упрощений и допущений удается представить ее в виде более или менее простых выражений.

Например, в работе [3] предлагается следующее выражение, выведенное на основе рекомендаций МККТТ (рекомендация G 222, Красная и Синяя книги, т. III) для систем уплотнения коаксиального кабеля на достаточно большое число каналов с промежуточными усилителями на полупроводниках:

$$l_y = \frac{A}{B - \dfrac{\ln l_y}{l_y}}, \qquad (2.71)$$

где l_y — максимально допустимая длина усилительного участка, *км*; $A = 11{,}5 + 2p_д - \ln z$, *неп*, $p_д$ — уровень передачи наибольшей неискаженной мощности (в работе [3] он принят равным 17,3—20,8 *дб* в расчете на перспективные типы транзисторов); z — количество статистически занятых телефонных каналов системы: $B = 2(\alpha_1 \sqrt{z\Delta} + \alpha_1' z\Delta)$, *неп/км*; α_1 — километрическое затухание коаксиальной пары при частоте 1 *Мгц*; $\alpha_1' \approx 17{,}3$ *дб/км*; Δ — ширина полосы частот, приходящаяся на один канал, *Мгц*.

Уравнение (2.71) решается методом итерации.

На основании анализа существующих отечественых систем уплотнения с промежуточными усилителями на электронных лампах для расчета максимально допустимой длины усилительного участка можно предложить следующее выражение:

$$l_y = \frac{a_y}{\alpha_в} = \frac{8{,}7 - \dfrac{1}{2}\ln N_c}{\alpha_в}, \text{ км}, \qquad (2.72)$$

где a_y — максимально допустимое затухание усилительного участка на верхней частоте линейного спектра; $\alpha_в$ — затухание цепи на верхней частоте линейного спектра.

На рис. 2.7 пунктиром показана зависимость максимального затухания усилительного участка от мощности системы, вычисленная согласно ф-ле (2.72), а точками показаны величины a_y для НУП отечественных систем уплотнения на электронных лампах [10]. Совпадение расчетных данных со справочными достаточно хорошее.

Для усилителей на полупроводниках (из анализа зарубежных систем) сохраняется аналогичная зависимость:

$$l_y = \frac{(7 \div 8) - \dfrac{1}{2}\ln N_c}{\alpha_в}. \qquad (2.73)$$

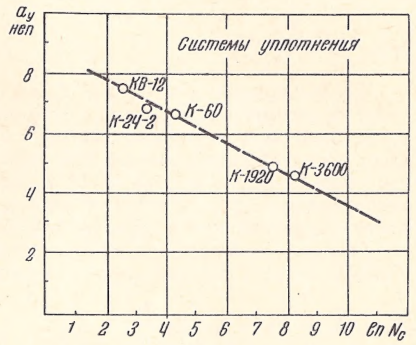

Рис. 2.7. Зависимость максимально допустимого затухания усилительного участка от числа каналов в системе уплотнения

Можно показать, что ф-ла (2.71) при определенных условиях сводится к (2.73). Действительно, учитывая, что ф-ла (2.71) применима при достаточно большом числе каналов ($N_c > 240$, при этом $B \gg \ln l_м / l_y$), потери в металле значительно превышают потери в диэлектрике ($\alpha_1 \sqrt{z\Delta} \gg \alpha_1' z\Delta$), а величина z стремится к N_c, из ф-лы (2.71), приняв $p_д = 2$ *неп*, как это сделано в работе [3] в расчете на перспективные типы аппаратуры, получаем

$$l_y \approx \frac{7{,}7 - \dfrac{1}{2}\ln N_c}{\alpha_в}.$$

Используя выражение (2.72), число промежуточных усилительных пунктов на кабельной магистрали можно определить в виде

$$n = \frac{l_м}{l_y} - 1 = \frac{\alpha_в l_м}{(7 \div 9) - \dfrac{1}{2}\ln N_c} - 1, \qquad (2.74)$$

где $l_м$ — длина магистрали.

На магистралях большой протяженности нужно учитывать вопросы дистанционного питания НУП. Если число НУП, питаемых от оконечной станции или ОУП, обозначить через $n_п$, то длина питаемого от одного ОУП участка (плеча питания) составляет

$$l_п = n_п l_y = \frac{a_y}{\alpha_в} n_п.$$